



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

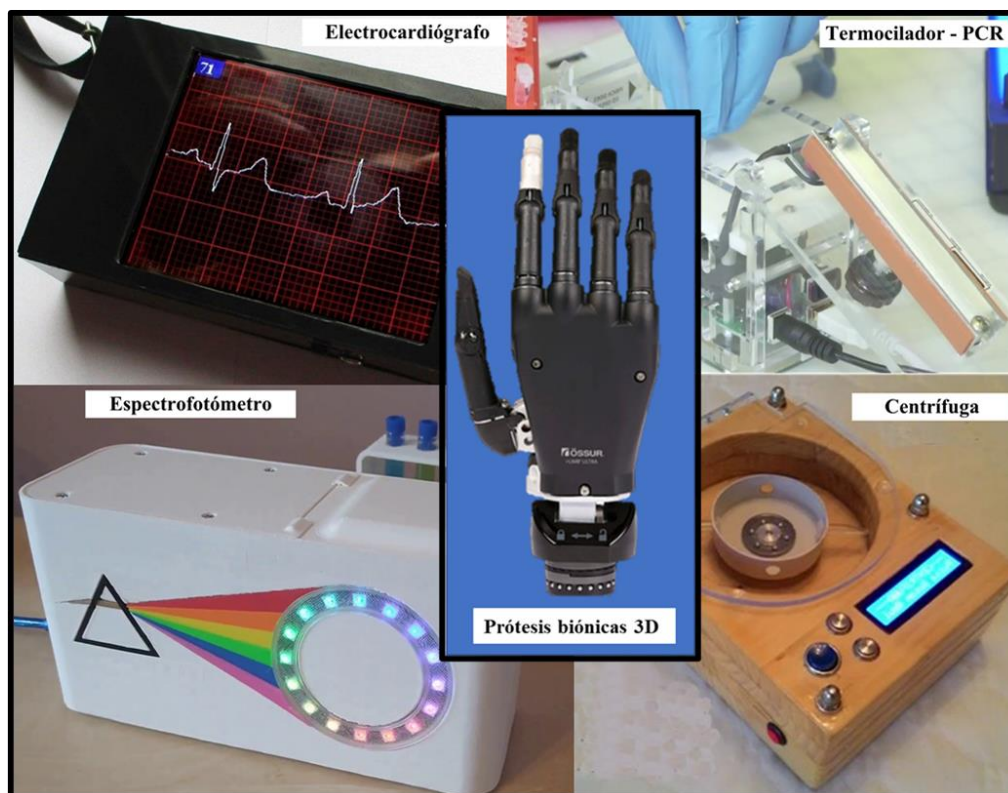


Facultad de Ciencias

GRADO EN BIOLOGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

APLICACIONES DE ARDUINO E IMPRESIÓN 3D EN BIOLOGÍA



Presentado por:

D. Aaron Gálvez Salido

Código:

ZOO-39

Fecha de presentación:

09/06/2021

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivos | 5 |
| 3. Metodología | 5 |
| 4. Aplicaciones en Fisiología Animal | 7 |
| 4.1. Electrocardiógrafo | 7 |
| 4.2. Espectroscopía de bioimpedancia..... | 8 |
| 4.3. Medición de glucosa en sangre..... | 9 |
| 4.4. Pulsioxímetro..... | 10 |
| 4.5. Ventilador mecánico para respiración artificial..... | 12 |
| 5. Aplicaciones en Bioquímica | 13 |
| 5.1. Espectrofotómetro | 13 |
| 5.2. Centrífuga | 14 |
| 5.3. Termociclador..... | 16 |
| 6. Aplicaciones en Ecología..... | 17 |
| 6.1. Datalogger | 17 |
| 6.1.1. Control de cultivos | 17 |
| 6.1.2. Control del medio marino | 18 |
| 6.1.3. Control de fauna | 19 |
| 7. Aplicaciones en Genética..... | 20 |
| 7.1. Electroporador | 20 |
| 8. Aplicaciones en Botánica..... | 21 |
| 8.1. Sistema para monitorizar plantas..... | 21 |
| 8.2. Fluorómetro de clorofila..... | 22 |
| 9. Monitorización de CO ₂ y SARS-CoV-2 | 23 |
| 10. Impresión 3D..... | 24 |
| 11. Conclusión..... | 26 |
| 12. Bibliografía..... | 27 |

RESUMEN:

En la presente memoria de TFG se pretende, por una parte, destacar la importancia de la programación, el uso de los microcontroladores y otras herramientas tecnológicas para el biólogo en la enseñanza y la investigación. Además, se recopilaron en este trabajo y en una página WEB (http://www.fisiologia-animal.es/bioingenieria/Arduino_Biologia.htm) los ejemplos más interesantes de aplicación de las placas Arduino e impresión 3D a la Biología para ponerla a disposición de los investigadores y estudiantes que lo necesiten. Para ello se describieron una serie de dispositivos y sus posibilidades de utilización catalogados por campos de la Biología, en concreto, Fisiología Animal, Bioquímica, Ecología, Genética y Botánica. También se incluyen dos apartados más, uno sobre la monitorización de CO₂ y su relación con el SARS-CoV-2 y otro exclusivo de impresión 3D aplicado a la Biología.

Palabras clave: Ingeniería aplicada a la Biología, Arduino, impresión 3D, Enseñanza e investigación.

1. INTRODUCCIÓN

En las actividades más comunes que realizan los biólogos, como la investigación y la enseñanza, frecuentemente se requiere del uso de ordenadores. Estas tareas donde se usa de forma auxiliar o casi necesariamente un ordenador, abarcan desde la planificación de los experimentos, búsquedas bibliográficas, recopilación y almacenamiento de datos, análisis estadísticos, publicar los resultados de los experimentos, realizar simulaciones en ordenador con alumnos, realizar explicaciones con presentaciones y material visual en general e incluso, debido a la situación actual, dar clases por completo en línea. Estas tareas son básicas hoy en día, pero debemos ir más allá y ampliar nuestros conocimientos en las tecnologías. El actual auge de las ciencias ómicas (Manzoni et al., 2018), tratan de estudiar los sistemas biológicos en su totalidad o conjunto, como la metabolómica, la genómica, la transcriptómica o la proteómica, están fundamentalmente basadas en la inevitable fusión de la Ingeniería y la Biología. La programación, el *big data*, el *machine learning*, las simulaciones multicomponentes, los microordenadores y microcontroladores son técnicas y tecnologías que cada vez se están implementando más en el ámbito de la Biología. La capacidad de conocer, entender y saber utilizar estas herramientas tecnológicas podría llegar a ser igual o más importante que la habilidad de mirar y ver por un microscopio. Tal y como hizo Anton van Leeuwenhoek junto a su microscopio y un cuaderno de notas, abriéndonos el camino al gran mundo de la Microbiología, los ordenadores y otras tecnologías asociadas podrían, de forma análoga, conducirnos a una nueva forma de aproximarnos a la compleja realidad biológica. La resolución a la que observamos el entorno y la vida es mayor si lo realizamos a través de las potentes tecnologías que heredamos de la ingeniería, sector que no para de crecer y renovarse y la Biología debe hacerlo sin quedarse atrás.

El fundamento de la informática es el pensamiento algorítmico. Consiste en la evaluación de un suceso y posteriormente, realizar un algoritmo o varios que resuelva de forma eficaz una determinada tarea relacionada con el suceso. En este ámbito, los algoritmos se realizan mediante la programación. Este tipo de estrategia para resolver problemas, en la que tomamos perspectiva y elaboramos mecanismos que nos den los resultados, es esencial para cualquier científico, en este punto es donde reside la importancia de enseñar programación a un biólogo. La forma de aprender pensamiento algorítmico en general y aplicado a la programación, es programando. Cualquier habilidad que requiera de una técnica concreta, se desarrolla practicando y siendo constantes y con la programación ocurre lo mismo.

Debido a la aplicabilidad de las tecnologías a las ciencias biológicas y los beneficios que se obtienen de enseñar programación a un biólogo, en el primer curso del grado de Biología en la Facultad de Ciencias de Granada se imparte la asignatura de Fundamentos de Informática para Biología. En esta asignatura se proporciona una formación básica en el campo de la informática donde cabe destacar que el lenguaje de programación que se imparte es *Python*. Este lenguaje de programación es de propósito general, su filosofía es la legibilidad de su código y además se encuentra en el segundo puesto en el ranking de popularidad con un índice de 11,87%, detrás de C con 13,38% (Según la edición de mayo de 2021 del índice TIOBE). Pero esto de enseñar programación a los biólogos y trabajar con simulaciones no es nuevo, antiguamente en la licenciatura de Biología de la Universidad de Granada, existía una asignatura llamada Fisiología Animal Aplicada, donde tenía mucha importancia las simulaciones por ordenador y la programación. Esta asignatura desapareció cuando se unificaron la Fisiología Animal Aplicada y la Fisiología Animal Ambiental durante la reestructuración de la licenciatura. También se han realizado numerosos proyectos en la Universidad de Granada como pueden ser el electrocardiograma educativo microcontrolado de 8 canales (realizado en el curso 2000-2001), la automatización de una piscifactoría (realizado durante el curso 2000-2001), el sistema de docencia de Fisiología Animal a distancia (curso 2004-2005) o el sistema de docencia de la Fisiología Animal mediante la utilización de robots biomorfos basados en redes nerviosas (años 2006 al 2009).

El ser humano para desenvolverse crea o utiliza como guía, incluso de forma inconsciente, representaciones de la realidad, los modelos. Es una parte fundamental del pensamiento humano y es muy importante para el entendimiento de la Biología y su enseñanza. Las simulaciones realizadas en ordenadores implican una implementación de un modelo matemático en un ordenador para producir datos de simulación. Una de las disciplinas de la Biología donde las simulaciones son claramente básicas para generar nuevo conocimiento o apoyar el que está asentado es la Fisiología. Esto viene de la conversión histórica de las explicaciones vitalistas a las mecanicistas de las funciones de los organismos que dependen, en gran medida, de modelos y analogías mecánicas. Las simulaciones proporcionan una forma de interactuar con los modelos, método magnífico para familiarizarse con ellos y verificar los límites de su validez. Recientemente ha aparecido un avance novedoso en este ámbito, simulaciones en realidad virtual, las cuales han demostrado que los estudiantes se ven muy beneficiados de esta tecnología y que además la disfrutan (Pande et al., 2021).

Para descubrir algo nuevo, a menudo, se debe construir algo nuevo. Una herramienta tecnológica muy útil para enfrentarnos a ese reto son los microcontroladores. Los cuales son circuitos integrados programables, capaces de ejecutar instrucciones guardadas en una memoria y se encuentran en multitud de dispositivos que utilizamos de forma cotidiana, ya sea un teléfono móvil donde encontramos multitud de ellos trabajando de forma conjunta, unos auriculares e incluso algunas tarjetas de crédito. Esta característica los convierte en herramientas muy polivalentes. Unos de los que ganaron mucha popularidad en la década de los 90 fueron los PIC, fabricados por la empresa americana Microchip. Se caracterizaron por tener un bajo coste, un consumo reducido de energía y un tamaño muy contenido. La popularidad de los microcontroladores PIC fue tal que en 1997 se publicó el primer libro sobre microcontroladores en español titulado “Microcontroladores PIC, la solución en un chip” por los autores E. Martín Cuenca, J. M^a. Angulo Usategui y I. Angulo Martínez. Sin embargo, los PIC, no son los únicos que se utilizan frecuentemente en la actualidad. Los microcontroladores AVR de la empresa Atmel, que actualmente forma parte de la empresa Microchip, también son muy populares. Cuando se trabaja con ellos, se suele recurrir a placas de prototipado rápido en las cuales se incluye un microcontrolador y varios periféricos asociados.

Con los años, la programación de los microcontroladores ha evolucionado facilitándose su programación. Encontramos numerosos ejemplos de aplicaciones de los mismos en Biología y además en campos muy distintos de esta ciencia. En el campo de la Fisiología Animal encontramos dispositivos como electrocardiógrafos, pulsioxímetros y medidores de glucemia basados necesariamente en los microcontroladores. En el campo de la Bioquímica se pueden destacar instrumentos de laboratorio como espectrofotómetros, centrifugas y termocicladores. En el ámbito de la Ecología, sin duda, uno de los dispositivos más utilizados son los instrumentos de recopilación de datos con sensores o *dataloggers*. En la rama de la Genética encontramos ejemplos como extractores de ADN y dispositivos de electroporación. Estos son solo unos ejemplos de sus casi infinitas aplicaciones a la Biología, de las que algunas tienen un gran impacto mediático en la actualidad, como el proyecto de la empresa Neuralink cuya propiedad es de Elon Musk, una de las personas más representativas en la actualidad de tecnología punta. Esta empresa tiene como objetivo el desarrollo de tecnologías especializadas en interfaces computadora-cerebro. Aunque parezca algo muy novedoso y futurista, realmente están uniendo con tecnología puntera muy potente, compacta y reducida, conceptos y fundamentos teóricos biológicos muy bien asentados, como los mecanismos de transmisión de los potenciales de acción descritos por Hodgkin y Huxley en la década de los cincuenta. Esto

puede llegar a entenderse como un movimiento de transición tecnológica de la Biología que, si bien tiene ya un largo recorrido, ahora es cuando está siendo más patente.

La filosofía de construcción de dispositivos por uno mismo analizando y comprendiendo el funcionamiento, se ha trasladado a la educación. Es un tipo de enfoque conocido en inglés por *Science, Technology, Engineering and Mathematics* (STEM), utilizado para una mejor asimilación de conceptos y que además mejora los resultados académicos (Ogrutan, 2017). El uso de este tipo de proyectos basados generalmente en *software* y *hardware* libre, como lo son algunos microcontroladores, suponen una reducción de costes en cuanto a materiales y además, cuenta con una gran comunidad que proporciona de forma inmediata, información de diseños e implementaciones. Algunos ejemplos de estos proyectos STEM son dispositivos para el análisis de glucosa en sangre (Khan et al., 2019), análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (Keenan et al., 2018) o para cuantificar la respiración celular (Piechnik et al., 2017). Pese al potencial que tienen los proyectos STEM en la enseñanza, aún no están muy introducidos en el ámbito educativo en España.

Al igual que los sistemas sensoriales de los animales, formados por unos receptores sensoriales, que captan la información y la convierten en señales eléctricas, y por centros integradores de la información, que procesan dichas señales, los dispositivos electrónicos son, en cierta medida, una analogía que con determinadas placas de prototipado, podremos construir de forma sencilla y ordenada donde el centro de integración de la información consiste en el microcontrolador que cabe en la yema de un dedo. Una de las placas de prototipado más utilizadas y económicas, son las que nos ofrecen la empresa Arduino. El funcionamiento de las placas de Arduino es relativamente sencillo, consisten en una serie de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas. Estas entradas y salidas son programables y con ellas podremos controlar dispositivos, tomar medidas de sensores, mandar datos vía serie o inalámbricamente entre otras cosas. Los microcontroladores que utilizan estas placas son los microcontroladores AVR. Arduino nos proporciona tanto *software* como *hardware* sencillo para reducir la complejidad de la tarea de programar y traducir lo que tienen que decirnos los sensores.

La impresión 3D ha saltado de ser algo restringido a la industria a poder ser un aparato más de un laboratorio e incluso de una casa. Es una tecnología capaz de producir estructuras tridimensionales, a partir de un modelo, en multitud de materiales que pueden ser biodegradables, resistentes o flexibles. Cuentan con un gran soporte de la comunidad y en Biología puede ser utilizado por ejemplo para crear prototipos rápidos de biodispositivos

(Palmara et al., 2021). La producción de modelos 3D puede realizarse mediante *softwares* libres como FreeCAD y una aplicación muy interesante es la de creación de modelos realistas como por ejemplo, proteínas o partes de un animal. Estos modelos resultan una forma más amigable de enseñanza para los estudiantes, mejorando la comprensión y retención de conceptos abstractos o difíciles (Monkovic et al., 2021).

La programación, las simulaciones, los microcontroladores y la impresión 3D son herramientas con un gran potencial en la Biología, en muchos casos, fundamentales para llevar a cabo determinadas tareas. El biólogo de hoy en día debería conocer estas herramientas y saber trabajar en equipos multidisciplinares para afrontar una realidad digitalizada y más eficiente.

2. OBJETIVOS

Con el presente trabajo se pretende proporcionar al biólogo conocimientos, ejemplos y posibilidades de utilización de la programación en la enseñanza y la investigación. Para ello, además de la memoria de TFG, donde se han descrito ejemplos de aplicación de las placas de prototipado de Arduino en diferentes campos de la Biología, se ha hecho una página WEB que contienen toda la documentación necesaria para realizar cada uno de los mismos (http://www.fisiologia-animal.es/bioingenieria/Arduino_Biologia.htm). Tras realizar una búsqueda bibliográfica extensa, se redactaron de forma ordenada los contenidos de la presente memoria con los artículos de mayor interés.

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo, se tuvo como punto de partida una serie de libros sobre programación, simulación y biodispositivos que se encuentran convenientemente referenciados en la bibliografía y adicionalmente, artículos científicos antiguos, que son la base de la electrónica aplicada a la Biología, a fin de tener una mayor perspectiva. En el apartado relacionado con la Fisiología Animal también se consultó el libro “Fundamentos de Fisiología” del autor Eugenio Martín Cuenca. Para la elaboración de los diferentes apartados, se realizó búsquedas de artículos científicos en dos bases de datos, Pubmed y Web of Science. En el caso de Pubmed, los criterios de búsqueda se mantuvieron con la configuración estándar excepto la fecha de publicación de los artículos, que fue modificada para que mostrase los artículos publicados entre el 2010 hasta el 2021. En el caso de Web of Science, la búsqueda bibliográfica se realizó con los criterios estándar ya que muestra directamente los artículos más actuales. En ambas bases de datos, al ser internacionales, se realizaron búsquedas combinando la palabra Arduino con algún campo de la Biología escrito en inglés (Genetics, physiology, ecology, ...).

Finalmente se seleccionaron aquellos artículos más actuales y en los que se describiera de forma suficiente la electrónica y el funcionamiento de los dispositivos, estuvieran relacionados directamente con la Biología y fueran aplicables a la enseñanza y/o a la investigación.

Las ilustraciones y fotografías presentes en este trabajo son extraídas de diferentes fuentes como vídeos y artículos y han sido referenciadas adecuadamente. Muchas son de elaboración propia. Para las fotografías propias se utilizó una Cámara Nikon D5300 con el objetivo AF-P Nikkor 18-55 mm. Para el procesado de las imágenes se utilizó el *software* ViewNX-i de Nikon y PowerPoint de la suite de Microsoft Office para añadir algunos detalles como textos y flechas.

Las impresiones 3D se realizaron con una impresora de tipo cartesiana, en concreto una Artillery Sidewinder X1 y el filamento utilizado en las impresiones siempre fue de la marca Sakata 3D, pionera en España en la producción de filamentos para impresión 3D y con centro productivo en Granada. El filamento utilizado, independientemente del color fue PLA 850. En el programa Cura versión 4.7 utilizado para el laminado y los ajustes de la impresión, se aplicaron los soportes en caso de ser necesario como para la impresión de cada vértebra de la columna vertebral, la altura de capa fue de 0,2 mm en impresiones que requerían cierto nivel de detalle y de 0,4 mm en impresiones donde no era tan relevante los detalles. La densidad de relleno se modificó entre el 15% y el 40%. La velocidad de impresión estuvo entre 35 mm/s para piezas con más detalles y los 60 mm/s para piezas con menos detalles. El resto de configuraciones se mantuvieron tal y como estaban en el perfil propio de la impresora Artillery Sidewinder X1. Todos los modelos anatómicos impresos en el presente trabajo fueron descargados de la página web thingiverse.com bajo licencia *creative commons*. En el caso del dispositivo de monitorización de CO₂, la carcasa es de diseño propio.

La redacción del trabajo se llevó a cabo completamente en el programa Word de la suite de Microsoft. La organización del mismo se ha realizado dividiendo los contenidos en apartados temáticos que hacen referencia, en primer lugar, a un campo de la Biología y después a los aparatos que se pueden relacionar de alguna forma con las actividades que se realizan en dicho campo. Además, se ha incluido un apartado extra sobre la monitorización de CO₂ por la especial situación en la que nos encontramos actualmente debido al virus SARS-CoV-2. Finalmente, en un apartado dedicado exclusivamente a la impresión 3D, se detallan las técnicas principales de impresión 3D y algunos ejemplos de aplicaciones en Biología.

4. APLICACIONES EN FISIOLÓGÍA ANIMAL

4.1. Electrocardiógrafo

El electrocardiograma (ECG) consiste en una representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón respecto al tiempo (Figura 1). El aparato capaz de medir las señales producidas por el corazón es el electrocardiógrafo.

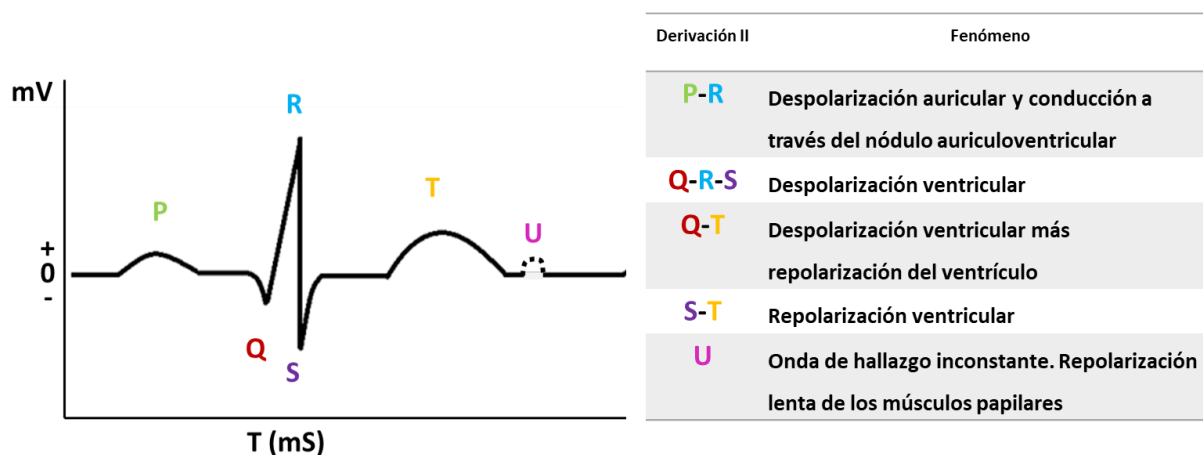


Figura 1.- Esquema de electrocardiograma obtenido mediante la derivación II. En el eje X se representa el tiempo en milisegundos y en el eje Y se representa el voltaje en milivoltios.

Un electrocardiógrafo se compone esencialmente de dos electrodos que se colocarán en diferentes partes del cuerpo de la persona a la que se le va a realizar el ECG, un electrodo será el positivo, otro el negativo y puede haber un tercer electrodo que será la toma neutra. Las señales eléctricas que emite el corazón son muy débiles, por lo que también se requiere de un circuito eléctrico de amplificación, un filtro para mantener las señales que nos interesan sin el ruido de posibles interferencias y un dispositivo que procese esas señales. Partiendo de esta base, podemos construir nuestro propio electrocardiógrafo basado en una placa Arduino Uno, la cual actuará como centro de procesamiento de las señales. En el mercado encontramos sensores ECG con una buena relación calidad precio, como el sensor analógico SEN0213 que incluye la etapa de amplificación y filtrado de la señal. Dicho sensor se conecta a la placa Arduino mediante tres cables, uno de alimentación, otro de toma de tierra y por último el de señal (Figura 2 A). Para la visualización del ECG se ha utilizado el Serial Plotter del IDE de Arduino (Figura 2 B).

Algunos autores hacen variaciones de este sistema básico convirtiéndolo en inalámbrico ya sea añadiendo módulos bluetooth (Ahamed et al., 2016) o módulos de radiofrecuencia (Memon et al., 2018 y Basari & Agung, 2018) e incluso hay prototipos de electrocardiógrafos portátiles (figura 3) (Miguel Bravo-Zanoguera, 2020 y Hugeng & Kurniawan, 2016). El uso de este dispositivo abarca desde hospitales con pocos recursos (Tiam Kapen et al., 2020) hasta

investigaciones donde se requiera un dispositivo fácil de adaptar a diferentes necesidades y por supuesto, en la enseñanza. Esta clase de aparatos son adecuados para utilizarlos en la explicación de los componentes de los dispositivos de electrocardiografía y el funcionamiento a alumnos, ya que son muy modulares y no muy difíciles de manejar.

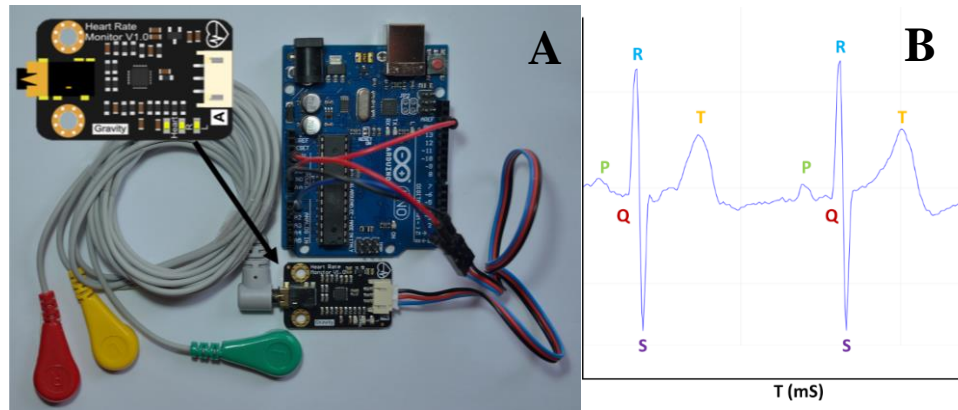


Figura 2.- A: Placa Arduino Uno rev3 con sensor analógico SEN0213. B: electrocardiograma, capturada del Serial Plotter del IDE Arduino y modificada.

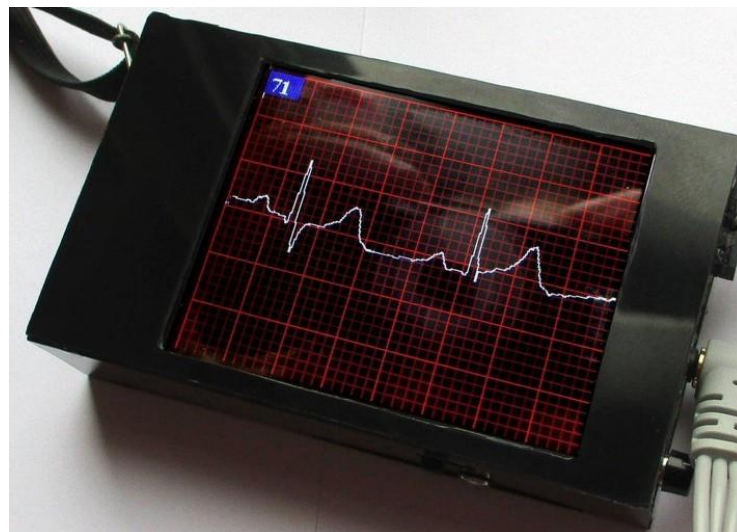


Figura 3.-Tomada de <https://www.instructables.com/ECG-Display-With-Arduino/>. Electrocardiógrafo compacto y con pantalla. La carcasa del dispositivo está impresa en 3D.

4.2. Espectroscopía de bioimpedancia

La espectroscopía de bioimpedancia consiste en un método de medida basadas en la inducción de pequeñas corrientes eléctricas alternas de frecuencia variable y de intensidad baja en el cuerpo humano, tejido o suspensión celular. Este tipo de dispositivos es utilizado frecuentemente en el campo de la Fisiología y la Patología. Puede utilizarse para estimar la composición del cuerpo humano, a través de la información del agua corporal total, líquido extracelular e intracelular, masa libre de grasa y la masa de grasa a partir de su impedancia.

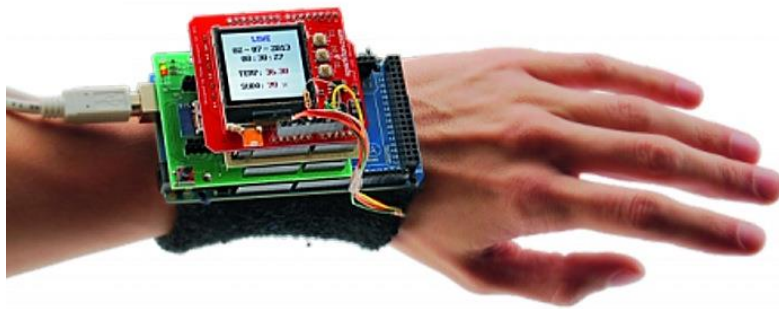


Figura 4.- Imagen extraída de <https://www.open-electronics.org/lewe-the-biometric-wristband/>. Medidor de sudoración mediante bioimpedancia con Arduino.

Los componentes principales de un dispositivo medidor de bioimpedancia son un generador de funciones programable que se utilizará para ajustar las frecuencias, un amplificador para adecuar la señal que se va a inducir, un amplificador de instrumentación para filtrar las señales analógicas que se van a medir, un conversor de corriente alterna en continua para la alimentación y una placa Arduino. El dispositivo se puede hacer tan compacto que quepa encima de una placa Arduino (Figura 4) y además pueden ser portátiles (de Corbellini & Vallan, 2014 y Khusnul et al., 2020).

Estos aparatos son muy útiles para realizar un seguimiento de numerosas variables que están asociadas a la resistencia diferencial del cuerpo humano. Las medidas se pueden utilizar para el diagnóstico de cánceres (Forte et Al., 2021), detección de isquemias (Goldkorn et al., 2020) y detección de edemas pulmonares (Alexandre et al., 2018). La lista de diagnósticos basados en bioimpedancia cada vez es más amplia, aunque aún queda mucho por investigar. También es un dispositivo adecuado para la educación porque se puede relacionar fácilmente con unas prácticas sobre metabolismo. Ciertas variables como la masa ósea, la muscular y la de grasa se pueden calcular con mediciones de la resistencia corporal y asociar con el estado metabólico de un alumno.

4.3. Medición de glucosa en sangre

La medición de glucosa en sangre está ganando cada vez más importancia, ya que el incremento de casos de diabetes en la población es exponencial. Estos pueden ser leves y pasajeros o crónicos y graves. Su detección precoz es clave para tomar las medidas necesarias y atenuar los problemas que acarrea esta enfermedad. Los dispositivos de medición de glucosa pueden ser químicos u ópticos. Entre los químicos se encuentra el sistema de tiras reactivas, donde el paciente debe utilizar una lanceta para extraerse sangre y depositarla por capilaridad en la tira. Esta tira contiene una serie de sustancias químicas que reaccionan y un lector permite determinar el nivel de glucosa en sangre, este es el método más utilizado comercialmente. Otro

método de medición química está basado en los compuestos volátiles, en concreto en la detección de acetona y etanol (Figura 5 B). Los niveles de estos compuestos fluctúan en el aliento de los diabéticos. Los sensores capaces de medir esto, son los semiconductores de óxido metálicos y lo hacen en una relación de partes por millón. Con las medidas de estos sensores se calcula la concentración de glucosa en sangre de forma no invasiva (Boubin & Shrestha, 2019).

Sin embargo, el método más extendido en la medición de glucosa con placas de Arduino es el óptico. Está basado en hacer incidir luz en un tejido a una determinada longitud de onda (se utilizan LEDs rojos-infrarrojos, entre unos 650 nm a 2500 nm) y medir la intensidad de luz cuando ha pasado por dicho tejido mediante un fotodiodo (Figura 5 A). La presencia de una concentración alta de glucosa en los tejidos, producirá una intensidad de luz menor en comparación a cuando hay poca concentración de glucosa.

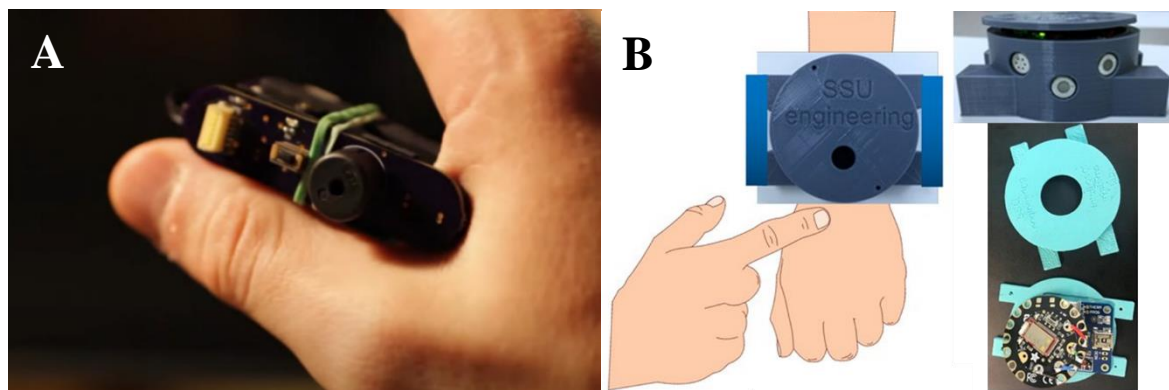


Figura 5.- A: Extraído del vídeo de Sean Hodgins: <https://www.youtube.com/watch?v=2np7Va2ASF0>. Medidor de glucosa en sangre óptico, B: Extraído y modificado de Shrestha et al, 2019. Medidor químico de glucosa en sangre

Los medidores ópticos construido con las placas Arduino pretenden estar disponibles en hospitales u hogares para un control constante mediante el envío de mensajes (Santoso et al., 2019 y Kevin Amos et al., 2020). También son una alternativa sin dolor a diferencia del método de tiras reactivas (Sunny & Kumar, 2018). Finalmente, estos dispositivos son utilizados para la concienciación de enfermedades como la diabetes y en la enseñanza (Khan et al., 2019).

4.4. Pulsioxímetro

El pulsioxímetro es un dispositivo que permite, de forma no invasiva, conocer el porcentaje de saturación de oxígeno de la hemoglobina en sangre y el pulso. Para ello, unos diodos LEDs emiten en una determinada longitud de onda, se utilizan en rojo (entre 650 nm y 700 nm) y en el infrarrojo (unos 2500 nm). Al pasar la luz de los LEDs emisores por los tejidos, la longitud de onda cambia y un fotorreceptor capta estas modificaciones (Figura 6 A). En base a estas variaciones de la longitud de onda, se realizan unos cálculos que determinan la saturación de

oxígeno y el pulso. El método comentado anteriormente es muy común pero también existe otro en el que se mide la luz reflejada por el dedo colocándose el fotorreceptor junto a los diodos emisores (Figura 6 B). Con una placa Arduino, una pantalla, los fotodiodos y el fotorreceptor se puede construir un pulsioxímetro totalmente funcional (Figura 7). Existen módulos que incluyen los diodos emisores y el receptor como los MAX30102 (Figura 6 C), con muy buena relación calidad precio.

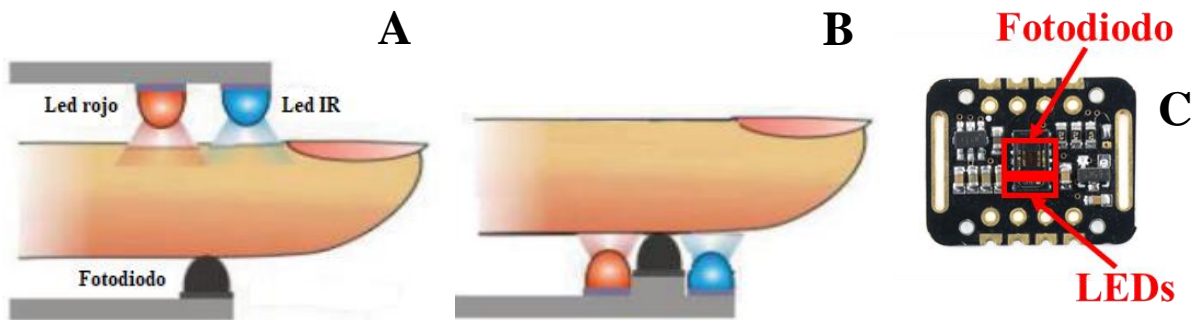


Figura 6.- A y B tomadas y modificada de Padmini et al., 2019. **A:** Método de medición del pulso y la saturación de oxígeno por transmitancia. **B:** Método de medición del pulso y la saturación de oxígeno por reflectancia. **C:** Extraída de <https://naylorlampmechatronics.com/biomedico/444-pulsioximetro-max30102.html>. Módulo MAX30102.

Estos dispositivos son ideales para uso doméstico ya que no es muy complejo construirlo y es sencillo utilizarlo (Sutar et al., 2016). El control de la saturación de oxígeno de forma frecuente ha tomado especial interés en la crisis provocada por el SARS-CoV-2. Cuando empieza a caer por debajo de los valores normales (valor normal: entre 95% y el 100%) el oxígeno en sangre, es señal de que algo está fallando en el proceso de ventilación pulmonar, siendo un problema grave y requiriendo hospitalización rápida. En relación a esto se han propuesto soluciones económicas basadas en placas Arduino que permiten un seguimiento preciso de la saturación de oxígeno y que, además, están conectadas a Internet vía WiFi para enviar los datos a los médicos (Miron-Alexe, 2020). El propio hecho de construir el pulsioxímetro

y utilizarlo también proporcionan una experiencia educativa muy interesante en institutos e incluso alumnos de universidades (Carcamo et al., 2019). Estos sensores se pueden combinar con otros, como los de medición de glucosa en sangre, para construir un sistema de monitorización paralela de muchas variables (Kevin Amos et al., 2020). Los sistemas

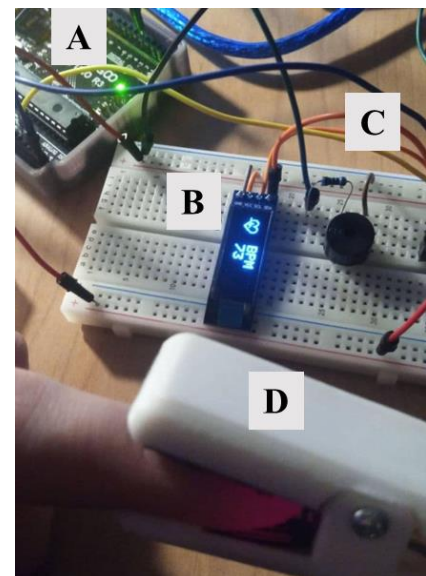


Figura 7.- **A:** Placa Arduino Uno **B:** Pantalla OLED **C:** Buzzer para el sonido de los latidos **D:** Pinza impresa en 3D con sensor

compuestos por multitud de sensores son de gran ayuda en investigaciones y en los hospitales, ya que aportan multitud de datos que se toman a la vez.

4.5. Ventilador mecánico para respiración artificial

La crisis del coronavirus ha provocado, debido a la escasez de recursos biomédicos, la construcción de aparatos médicos para situaciones de emergencia. Uno de los aparatos que más hicieron falta para salvar vidas han sido los ventiladores mecánicos (Figura 8). Estos sirven para suplir o ayudar a la función respiratoria de los individuos que lo requieran. Funcionan regulando la frecuencia de la respiración y el volumen de aire que se insufla al paciente. Para controlar estas variables, se requiere de un sistema formado por electroválvulas que regularán el flujo de entrada, el de salida y la presión del aire, y un centro donde se procese las señales y se ajusten a unas determinadas necesidades. El centro de procesado y control de la electrónica de estos aparatos puede ser una placa Arduino (Figura 9).

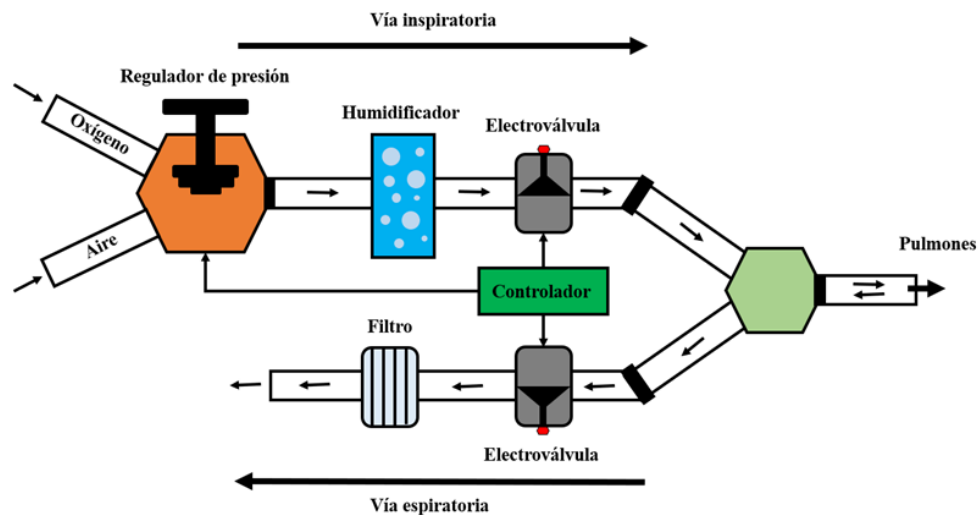


Figura 8.- Esquema general de las partes de un ventilador mecánico.

La construcción de ventiladores mecánicos basados en placas Arduino tuvo una buena acogida, ya que permite la fabricación de muchos dispositivos rápidamente, fácilmente y con componentes baratos. Estas características lo hacen ideal para situaciones de alto riesgo donde se requiera una actuación rápida. En muchos países tienen escasez de recursos médicos y es aquí donde pueden ser más útiles estos aparatos (Zuckerberg et al., 2020 y Garmendia et al., 2020).



Figura 9.- Respirador mecánico basado en Arduino construido por el equipo español Resistencia Team.

5. APLICACIONES EN BIOQUÍMICA

5.1. Espectrofotómetro

La espectrofotometría es una técnica analítica que consiste en medir cuanta luz absorbe una determinada sustancia y el aparato que realiza esta tarea es el espectrofotómetro. Este es capaz de proporcionarnos el valor de absorbancia de una determinada sustancia gracias a la medición de la intensidad de un haz luminoso cuando pasa por una disolución. Una vez obtenido este valor, gracias a la ley de Lambert-Beer se podrá calcular la cantidad de un producto químico conocido en una disolución. Es una técnica utilizada extensamente en cualquier laboratorio. En la construcción de este dispositivo existen dos vertientes, los que están basados en fotorresistencias (Figura 10 A) y los que se construyen con un sensor de color (Figura 10 B).



Figura 10.- A: Imagen tomada del video de Daniel Hingston: https://www.youtube.com/watch?v=vP9oaMI_R7s. Espectrofotómetro basado en fotorresistencia **B:** Imagen tomada de la web: https://www.appropedia.org/Open-source_colorimeter#Media. Espectrofotómetro basado en sensor de color. Ambos están contruidos usando impresión 3D.

Los espectrofotómetros basados en fotorresistencias, en general, son menos precisos y más útiles para la enseñanza en colegios e institutos (Yuniati & Rifai, 2019). Gracias a la flexibilidad de las placas Arduino, también se pueden construir espectrofotómetros especializados en tomar medidas de una determinada sustancia. Entre estos, encontramos dispositivos pensados para hospitales, capaces de medir la glucosa en sangre siguiendo el mismo principio físico (Chaianantakul et al., 2018). Otro caso curioso y muy útil para investigaciones marinas o para mantener un control de estos medios, serían los espectrofotómetros capaces de medir el pH de las muestras de agua (Yang et al., 2014). Una ventaja muy importante de estos sistemas es que son muy compactos, a veces mucho más que las opciones comerciales, y portátiles ya que no necesitan estar conectados a la red eléctrica de forma constante. La capacidad de tomar medidas de espectrofotometría en el campo directamente, tiene ventajas considerables. Muchas muestras son muy volátiles y se degradan

rápidamente por lo que un espectrofotómetro portátil (Figura 11) puede ser de gran ayuda en estos casos (Poh et al., 2021).

La versatilidad de las placas Arduino, unido a la impresión 3D facilita de forma muy significativa la tarea de construcción e implementación de un dispositivo como puede ser un espectrofotómetro. Además, permite ajustarse a cualquier necesidad o reto al que se enfrente un biólogo, tanto para la enseñanza como para la investigación (Conte et al., 2018).

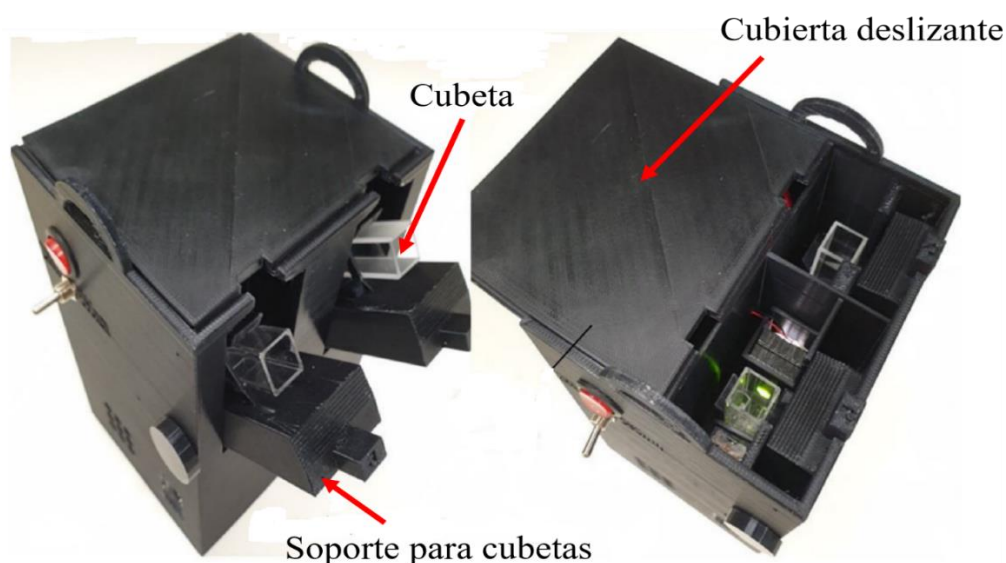


Figura 11.- Tomada y modificada de Poh et al., 2021. Espectrofotómetro portátil e impreso en 3D.

5.2. Centrífuga

Las centrífugas son dispositivos utilizados ampliamente en campos como la Química, la Biología, la Bioquímica y la Medicina. Estas sirven generalmente para separar suspensiones y líquidos inmiscibles mediante la fuerza centrífuga, produciendo una estratificación de los elementos en base a su densidad.

La electrónica básica de estos aparatos se puede reducir a un motor, un sensor para medir las revoluciones, un sistema para visualizar los ajustes (Un ordenador, una pantalla LCD, ...), unos botones para realizar las configuraciones y un microcontrolador que interactúe con el resto de la electrónica. El motor puede ser una de las piezas más caras de este aparato, pero se pueden reutilizar de los cada vez más anticuados, lectores de DVD (Figura 12 A) y discos duros mecánicos (Figura 12 B) (Sadegh-Cheri, 2020). Si se requiere más potencia, también se puede recurrir a los pequeños pero potentes motores de los drones. Estos dispositivos alcanzan las mismas revoluciones que uno comercial y por lo general, presentan las mismas funcionalidades.

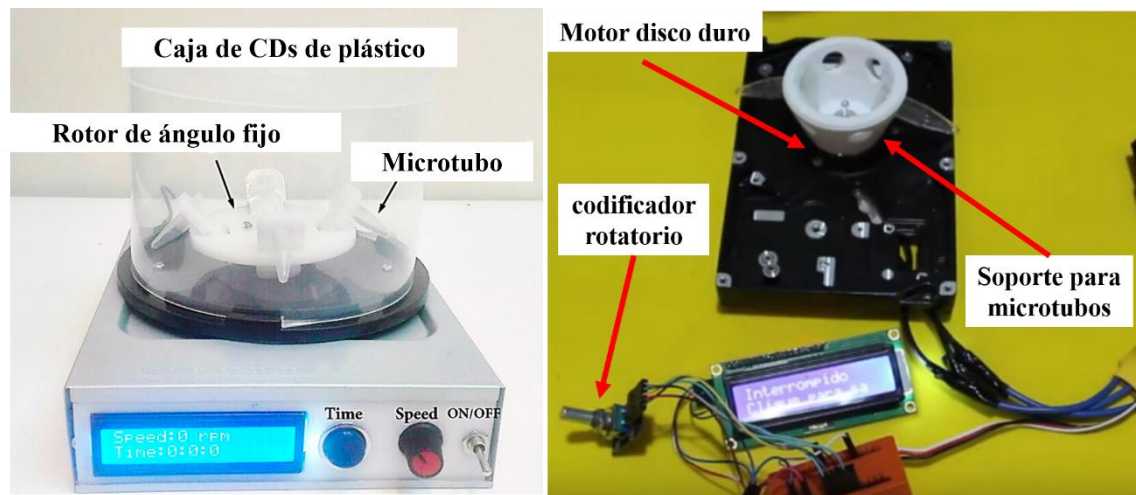


Figura 12.- A: Tomada y modificada de Sadegh-Cheri, 2020. Centrífuga construida con un motor de DVD. El soporte de los microtubos está impreso en 3D y la tapadera es la tapa de una caja de CDs. **B:** Tomada y modificada de <https://www.instructables.com/DIY-Lab-HD-Centrifuge-Arduino-Based/>. Centrífuga construida con un motor de disco duro. El soporte de los microtubos está impreso en 3D.

Las placas Arduino también permiten la construcción de centrífugas para realizar pruebas muy concretas, como ensayos de inmunoabsorción ligados a enzimas, conocida en inglés por las siglas ELISA (*Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay*) (Abe et al., 2020). Es una técnica que requiere una centrífuga basada en microfluidos y que sirve por ejemplo, para realizar los test rápidos para detectar anticuerpos frente al SARS-CoV-2. Esto es muy útil para detectar enfermos de COVID en países donde no se puedan permitir adquirir este tipo de centrífugas y además el tamaño es muy reducido (Figura 13).

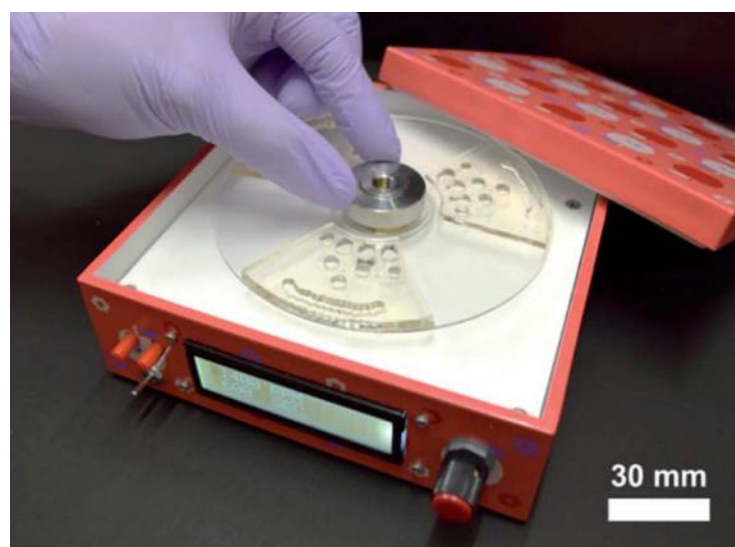


Figura 13.- Tomada y modificada de Abe et al., 2020. Centrífuga de microfluidos basada en Arduino.

5.3. Termociclador

Los termocicladores son dispositivos programables indispensables para realizar la reacción en cadena de la polimerasa (*Polymerase Chain Reaction*, PCR). Su funcionamiento se basa en el calentamiento y enfriado de forma cíclica de la muestra que se quiere amplificar. La mayoría de los ensayos de diagnóstico molecular están basados en la PCR y por lo tanto se requieren de los termocicladores.

Los componentes de un termociclador se pueden reducir a una lámina metálica con una resistencia que se calentará y una célula Peltier (Figura 14 A) que enfriará dicha lámina. Todo esto debe estar controlado por un sistema que gestione los tiempos y temperaturas que cambiarán cíclicamente. Este sistema de control podría ser una placa Arduino. Como se comentaba anteriormente, estos aparatos son indispensables para ciertos diagnósticos como por ejemplo el de la COVID-19. Sin embargo, suelen ser caros y muy voluminosos. Una alternativa igual de eficiente, más compacta y más asequible son las que se basan en placas Arduino (Oliveira et al., 2021). Uno de los ejemplos del potencial que tienen estos aparatos es el del denominado minipcr (Figura 14 B) construido por dos biólogos argentinos, Sebastián Kraves y Ezequiel Álvarez. Es un aparato muy interesante para la enseñanza, ya que permite ver perfectamente las partes que forman un dispositivo para realizar la PCR. También su pequeño tamaño lo hace ideal para su uso en el espacio, donde cada incremento de peso aumenta demasiado los costes para sacar el cohete de la atmósfera.

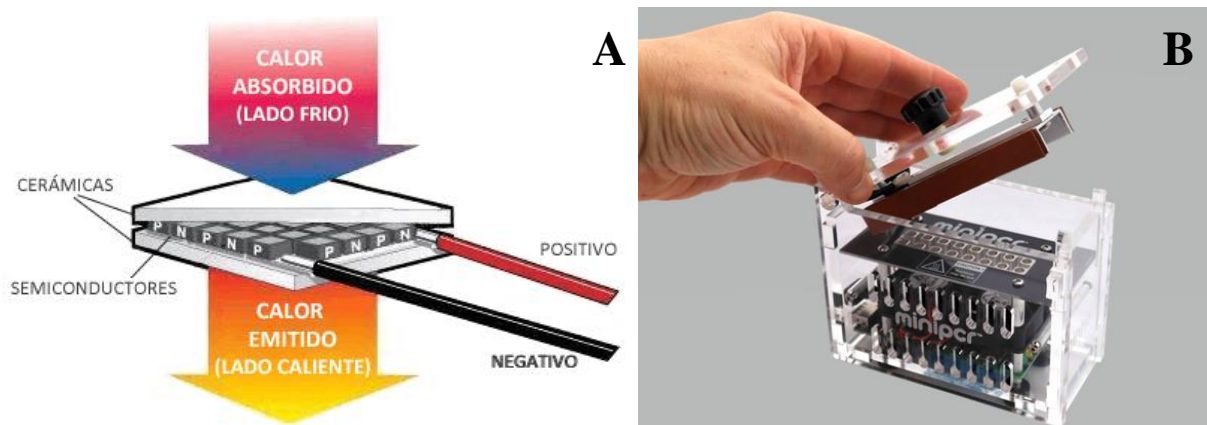


Figura 14.- A: Imagen extraída de <https://www.luisllamas.es/arduino-peltier/>. Esquema de célula Peltier. **B:** Imagen tomada de Sebastián Kraves y Ezequiel Álvarez Saavedra. Termociclador de tamaño muy reducido.

En casos muy extremos donde los recursos son casi mínimos, se puede construir con Arduino y latas de comida, una máquina de PCR (Wong et al., 2015). Está basado en el sistema tradicional de ir pasando las muestras por baños a diferentes temperaturas, pero automatizados gracias a un sistema de servos controlados por la placa Arduino.

6. APLICACIONES EN ECOLOGÍA

6.1. Datalogger

Los registradores de datos o en inglés *datalogger*, son unos dispositivos electrónicos que registran de forma secuencial una serie de datos en un tiempo determinado en relación a la ubicación mediante sensores conectados de forma externa. Este tipo de aparato es utilizado frecuentemente en el ámbito de la ecología para monitorizar a tiempo real determinadas ubicaciones de interés y recopilar gran cantidad de datos que son almacenados para poder ser analizados posteriormente.

6.1.1. Control de cultivos

Tanto en investigación como en agricultura, tener el control de las variables que afectan los cultivos es de suma importancia. Los *datalogger* (Figura 15 A) pueden ser de gran ayuda en estos casos, ya que son capaces de medir y almacenar datos sobre la humedad del suelo, la temperatura, la humedad relativa, la luz que llega a las plantas, etc. Estos datos asociados a un sistema de riego, podrían activar o desactivar dicho sistema para una mejor gestión del agua.

Uno de los experimentos ecológicos más recurrentes en los últimos años ha sido la simulación de escenarios. Un sistema de cultivo totalmente controlado por Arduino, donde podemos elegir que variables modificar, permiten realizar estudios de este tipo (Figura 15 B). Podríamos plantearnos diferentes situaciones climáticas y comprobar qué pasaría en las plantas que se estén estudiando (Arunachalam & Andreasson, 2021).

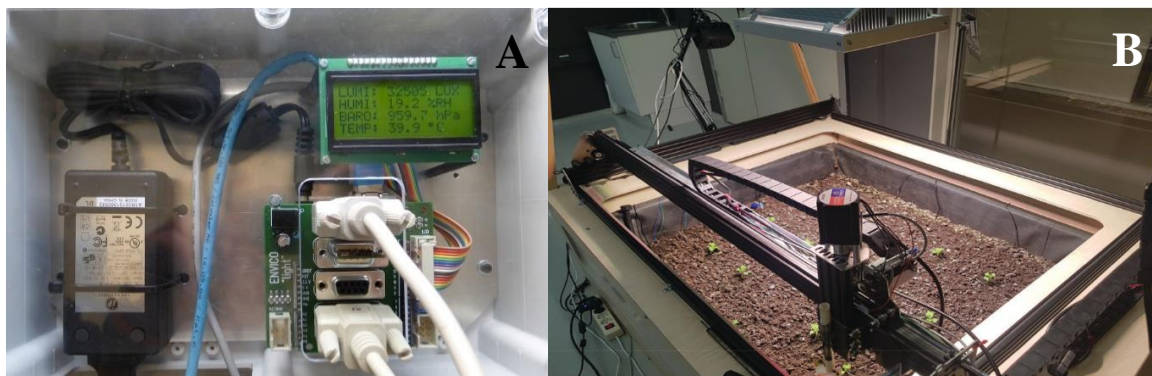


Figura 15.- A: Imagen extraída de https://www.changpuak.ch/electronics/Envico_Mainframe.php. Fotografía de un *Datalogger* **B:** Tomada de Arunachalam & Andreasson, 2021. sistema de cultivo basado en Arduino.

En cuanto al uso en cultivos, el uso de este tipo de tecnologías permite reducir al máximo el gasto en agua y mejorar la eficiencia de los cultivos. Los agricultores consiguen mayor eficiencia y rentabilidad. Además, se reduce el impacto ecológico que produce el gasto innecesario de agua (Rianmora et al., 2020 y Rivas-Sánchez et al., 2019).

6.1.2. Control del medio marino

Trabajar en el medio marino requiere una infraestructura dedicada y suele ser costosa. Una solución a la que se recurre con frecuencia es el uso de satélites para realizar estudios de la dinámica marina mediante teledetección, pero esto tiene numerosos inconvenientes. Si bien es muy cómoda para realizar investigaciones de aguas superficiales, es ineficiente a la hora de poder estudiar el resto de la complejidad de este medio, ya que lo que ocurre en aguas superficiales es muy distinto a lo que ocurre en niveles más profundos.

Las placas Arduino son de gran ayuda en estos casos, reduciendo costes y realizando un control más que adecuado en cuanto a medición de diferentes variables como temperatura o acidificación de las aguas marinas (Duarte et al., 2015). Esta recopilación de datos es muy importante para, tras su análisis, comprender el estado de las aguas y su evolución en el tiempo.

El efecto del cambio climático ha puesto en el punto de mira los ecosistemas de arrecifes de coral. La asociación entre el *bleaching* o blanqueamiento de los corales y el incremento de la temperatura es un problema de conservación muy bien documentado. Cuantos más sensores y más próximos a estos ecosistemas, mejor podremos comprender los cambios que están ocurriendo. Para monitorizar la temperatura del agua próxima a los corales, mediante placas Arduino, solo se requiere de un recipiente estanco, baterías, el sensor de temperatura, una memoria para almacenar datos y la propia placa (Hendee et al., 2020). Este pequeño dispositivo se puede construir en gran número incluso por alumnos, ayudando así a cuidar el medio marino y ampliando sus conocimientos al respecto (Figura 16).

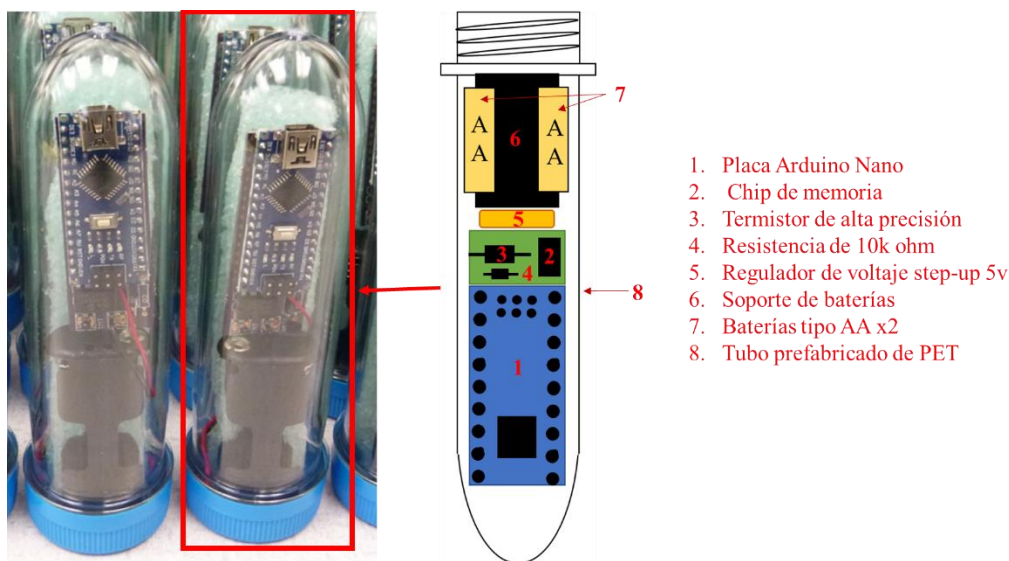


Figura 16.- Tomada y modificada de Hendee et al., 2020. Dispositivo marino de medición de temperatura de alta precisión.

6.1.3. Control de fauna

Debido al impacto antrópico en las poblaciones de animales, un buen control y gestión de las mismas se ha convertido en una necesidad. Tanto para la ganadería como para animales salvajes, tener un conocimiento amplio de los movimientos y el número de individuos es una tarea importantísima para el medioambiente y el sector ganadero. Existen multitud de técnicas que se utilizan con esta finalidad, como rastreo por radiofrecuencia, seguimiento por imágenes, localización por GPS, etc. Estas tienen claros inconvenientes, cuando se quiere comprender la dinámica de los movimientos de una población, no basta con unos pocos dispositivos y, además, estos suelen ser costosos y difíciles de recuperar cuando fallece el animal.

El desarrollo e implementación de dispositivos de seguimientos basados en microcontroladores, abarata los costes y además permite poder distribuir un mayor número de dispositivos. Existe una tecnología compatible con las placas Arduino muy interesante basada en una red de nodos y puertas de comunicación mediante radiofrecuencia llamada LoRa (dos Reis et al., 2021). Cada animal lleva una electrónica asociada (Sensores de movimiento, acelerómetros, ...) y un módulo LoRa, lo cual forma un nodo. Los nodos, cada animal al que se le ha instalado el dispositivo (Figura 17 A), se comunicarían con la puerta, dispositivo formado por una antena LoRa que puede almacenar los datos en chips de memoria o conectarse a internet y enviarlos a una base de datos. También hay sistemas más sencillos aún y adaptables a los requisitos de cada animal, formados tan solo por un módulo GPS, los sensores que se requieran para el estudio o el control de la población, una batería y una placa Arduino que controle los sistemas. Este último, gracias al ser tan compacto, permite su uso tanto en animales voluminosos como en aves (Figura 17 B) (Fahlbusch & Harrington, 2019 y Foley & Sillero-Zubiri, 2020). Ambos sistemas facilitan la tarea de estudios ecofisiológicos y de control de poblaciones gracias al abaratamiento de los costes y la versatilidad.



Figura 17.- A: Fotografía tomada de dos Reis et al., 2021. Dispositivo de seguimiento basado en tecnología LoRa. **B:** Fotografía tomada de Fahlbusch & Harrington, 2019. Dispositivo de seguimiento basado en módulo GPS.

7. APLICACIONES EN GENÉTICA

7.1. Electroporador

La electroporación o también llamada electroporación, es una técnica que consiste en producir un aumento de la conductividad eléctrica y la permeabilidad de la membrana plasmática celular mediante pulsos eléctricos aplicados de forma externa. Generalmente esta técnica es usada para introducir material genético dentro de células, aunque también se puede utilizar para introducir nanomoléculas o nanomateriales.

Los electroporadores comerciales son instrumentos poco adaptables a diferentes situaciones, voluminosos y tremendamente caros. La parte más importante de un electroporador, es el generador de pulsos de alto voltaje. En el mercado encontramos en abundancia circuitos con toda la electrónica necesaria para el generador, por lo que lo único que falta es un sistema que controle dicho circuito. Este papel de control lo puede asumir una placa Arduino cuyas funciones principales son ajustar la amplitud, la frecuencia del pulso y disparar dicho pulso (Sulaeman & Widita, 2015).

Uniendo la electrónica comentada anteriormente con la impresión 3D (Schmitt et al., 2019), se puede construir un electroporador profesional para uso en laboratorio totalmente funcional y muy semejante a los comerciales (Figura 18). Sin embargo, esta alternativa es más económica, compacta y versátil, ya que se podría adaptar totalmente a trabajar con cualquier tipo de muestras. Todas estas ventajas son interesantes para aplicar estos dispositivos a la investigación, pero también son una forma de poner al alcance de los estudiantes tecnologías que de otra manera no se podría por su elevado coste.

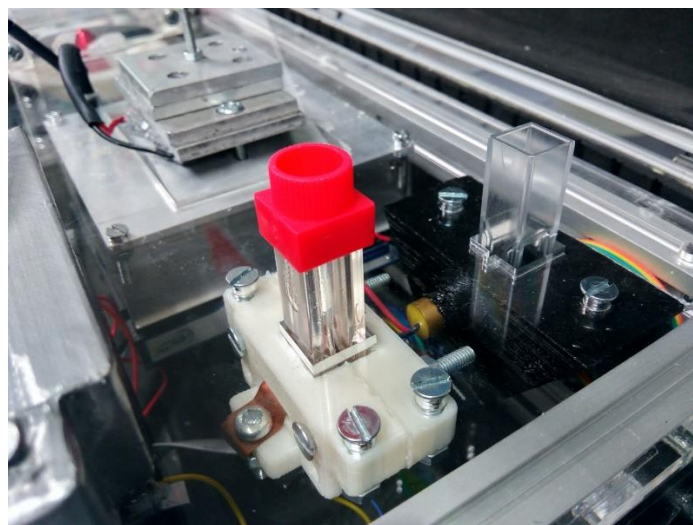


Figura 18.- Imagen tomada del equipo español Team Valencia:
http://2016.igem.org/Team:Valencia_UPV/Hardware. Electroporador basado en Arduino.

8. APLICACIONES EN BOTÁNICA

8.1. Sistema para monitorizar plantas

Cuando se quiere estudiar el efecto que tiene modificar las variables ambientales sobre una planta, los investigadores deben idear un sistema para poder mantener controladas dichas variables e ir modificándolas de una en una. Esto puede ser una tarea tediosa y que requiera de mucho ingenio para construir el sistema que se necesite en cada caso. La programación junto a las bondades de las placas Arduino pueden reducir la complejidad de este problema y resolverlo de forma muy satisfactoria.

Primero, debemos plantearnos qué variables necesitamos controlar, para después seleccionar los componentes que se requieran. Un sistema básico podría ser uno en el que se controle la humedad, la temperatura, la luz y el agua (Janpla et al., 2019). Dicho sistema puede ser cerrado o abierto (Figura 19), pero en ambos casos se requiere de un método para ir almacenando las medidas de los sensores ya sea en una memoria o vía WiFi o Ethernet en un servidor.



Figura 19.- Imagen tomada de <https://thetempedia.com/project/plant-monitoring-system/>. Sistema abierto de monitorización de plantas.

En cuanto a los sistemas cerrados, destacan las cámaras de ambiente enriquecido en CO₂. El efecto que tiene el CO₂ en las plantas es muy interesante estudiarlo ya que no todas responden igual y en algunos casos se puede incrementar la producción de los cultivos. Estas cámaras están formadas por tres elementos básicos, un sensor para medir la concentración de CO₂, una fuente de dicho gas y un centro de control. Por tanto, con una placa Arduino que asuma el control del aparato, se pueden construir este tipo de cámaras (Chen & Markham, 2020).

Estos sistemas son muy útiles en la investigación, pero también son visuales e interactivos para aplicarlos a la enseñanza.

8.2. Fluorómetro de clorofila

Una de las pruebas más usuales para medir el estrés en una planta consiste en medir la fluorescencia emitida por la clorofila *a*. Este fenómeno se produce eventualmente cuando las plantas absorben la energía solar. Esta no es absorbida en su totalidad por la planta, si no que puede disiparse en forma de calor y/o puede disiparse emitiendo fluorescencia. Los fisiólogos vegetales han encontrado una relación entre el estado redox de las unidades fotosintéticas activas y la fluorescencia emitida por el fenómeno descrito anteriormente.

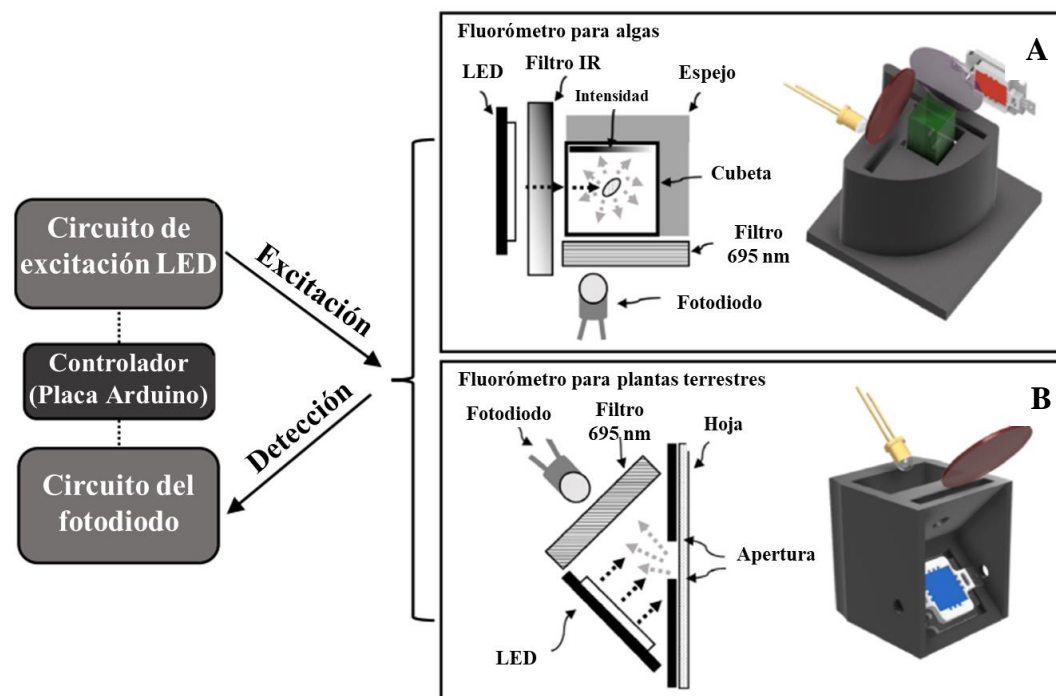


Figura 20.- Imagen tomada y modificada de Bates et al., 2019. **A:** Fluorómetro para algas. **B:** Fluorómetro para plantas terrestres. Las estructuras son imprimibles en 3D.

Para poder medir este fenómeno fisiológico se requiere principalmente de tres partes, un circuito excitador de la clorofila, un circuito que mida la fluorescencia y un controlador como una placa Arduino (Figura 20). También hay que tener en consideración por una parte si necesitamos medir en algas o en plantas terrestres ya que requieren una estructura diferente y además, también debemos añadir filtros, de luz roja 650-700 nm e infrarroja 2500 nm, para medir únicamente la fluorescencia.

Con este dispositivo se puede equipar un laboratorio de fisiología vegetal, para así poder realizar prácticas en relación a este fenómeno. También es muy interesante su uso en investigación tanto en medios marinos, estudiando las algas, como en medios terrestres ya que permite tomar medidas muy precisas.

9. MONITORIZACIÓN DE CO₂ Y SARS-COV-2

La monitorización de la concentración de CO₂ en lugares cerrados como centros comerciales, escuelas y universidades no ha sido una prioridad hasta la llegada de la crisis del coronavirus. La Organización Mundial de la Salud marca un límite de 1000 ppm de CO₂ en interiores. Las medidas de concentración de este gas nos permiten establecer una relación con la calidad del aire en general y la eficiencia de la ventilación, estando los valores recomendados entre 400 y 500 ppm o menos.

Se ha comprobado que la mayor parte de los contagios producidos por coronavirus, al igual que muchos otros virus y microorganismos, se produce por aerosoles que persisten en el aire. Es por esto que la monitorización de la calidad del aire es cada vez más importante (Mumtaz et al., 2021).

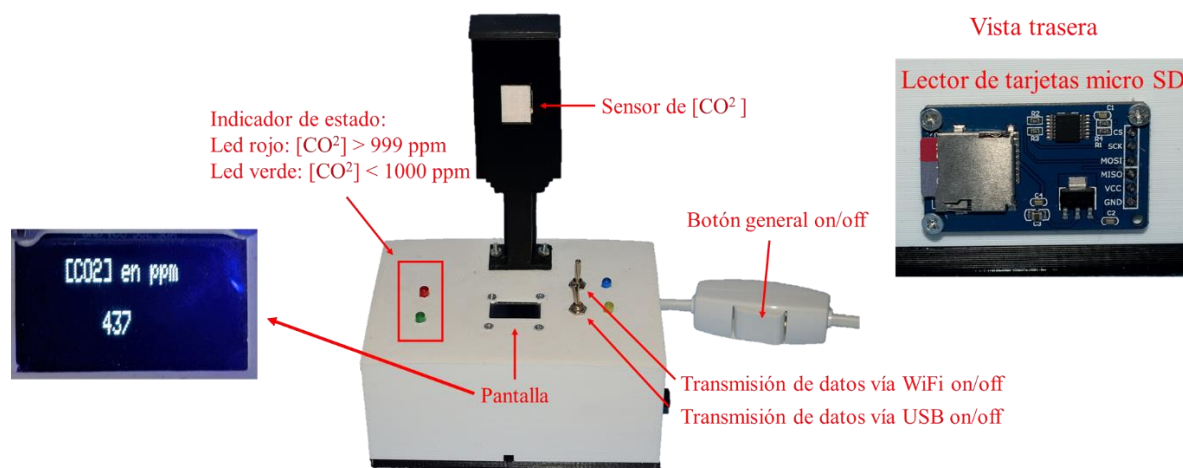


Figura 21.- Dispositivo de monitorización de CO₂ basado en Arduino.

Debido a lo comentado anteriormente se decidió construir desde cero un dispositivo propio basado en una placa Arduino 33 IoT. La elección de esta placa se debe a sus capacidades de conexión wifi. El aparato está compuesto por un sensor infrarrojo no dispersivo (o sensor NDIR, por sus siglas en inglés, *Non Dispersive Infrared Detector*) de la marca DFROBOT (sensor SEN0219), una pantalla OLED, un lector de tarjetas SD, un amplificador de instrumentación, una fuente de alimentación, la placa comentada anteriormente y una serie de botones y LEDs (Figura 21). La sensibilidad de este dispositivo abarca desde la 0 ppm de CO₂ hasta 5000 ppm, con una precisión de ± 50 ppm y las medidas son tomadas con una frecuencia de un minuto. Estas características son suficientes para el trabajo para el que está destinado, control de la calidad el aire en interiores y su posterior relación con el riesgo de contagio de enfermedades infecciosas por aerosoles. La carcasa del aparato fue construida mediante impresión 3D.

Este dispositivo almacena los datos en una tarjeta micro SD y, gracias a la conectividad WiFi es capaz de mandar las medidas tomadas a páginas como ThingSpeak, permitiendo la visualización de las medidas en un dispositivo móvil o un ordenador. También puede ver la última medida tomada en la pantalla OLED y mediante un LED rojo y otro verde, a modo de alarma, podremos distinguir si la concentración de CO₂ es superior a 999 ppm, es decir 1000 ppm o más. Mediante dos palancas podremos configurar el dispositivo en modo transmisión de datos vía WiFi y/o USB para ver los datos desde que se encendió el aparato.

Como resultado, este instrumento de medida puede ser utilizado en aulas para mantener seguros tanto al personal docente como al alumnado. Además, son capaces de evaluar la eficacia de los sistemas de ventilación y realizar estudios en relación a la concentración de CO₂ ambiental.

10. IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D es una tecnología capaz de, a partir de un modelo 3D diseñado digitalmente, construirlo de forma automática. Según el funcionamiento del dispositivo de impresión se diferencian una serie de sistemas muy consolidados y, además cada vez aparecen nuevos modos que nos permiten fabricar piezas usando materiales de diferentes características. Todas pueden ser utilizadas en el ámbito biológico, pero sin duda las más extendidas son las de tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*), basada en la deposición por fundición de filamento y SLA (*Stereolithography*), donde la acción de un láser en una resina la va polimerizando y endureciendo.

Estas técnicas tienen una aplicación directa en Biología y es la creación de modelos, ya sea para investigación o para la enseñanza. La Biología es una ciencia visual y para la comprensión de conceptos y mecanismos muchas veces no basta con textos y palabras, si no que debemos observar. Una buena forma de observar estructuras sin la necesidad de métodos invasivos o técnicas complejas son los modelos 3D (Figura 22). Estos modelos tienen ventajas más que claras frente a imágenes y es que la comprensión de una estructura tridimensional compleja, es más sencilla con modelos que se aproximen a esta realidad tridimensional (Monkovic et al., 2021). Las impresoras 3D permiten la generación de estos modelos en gran número de formas precisas (más o menos precisa según la técnica de impresión empleada y su resolución asociada) y medianamente barata en comparación con comprar los modelos directamente.

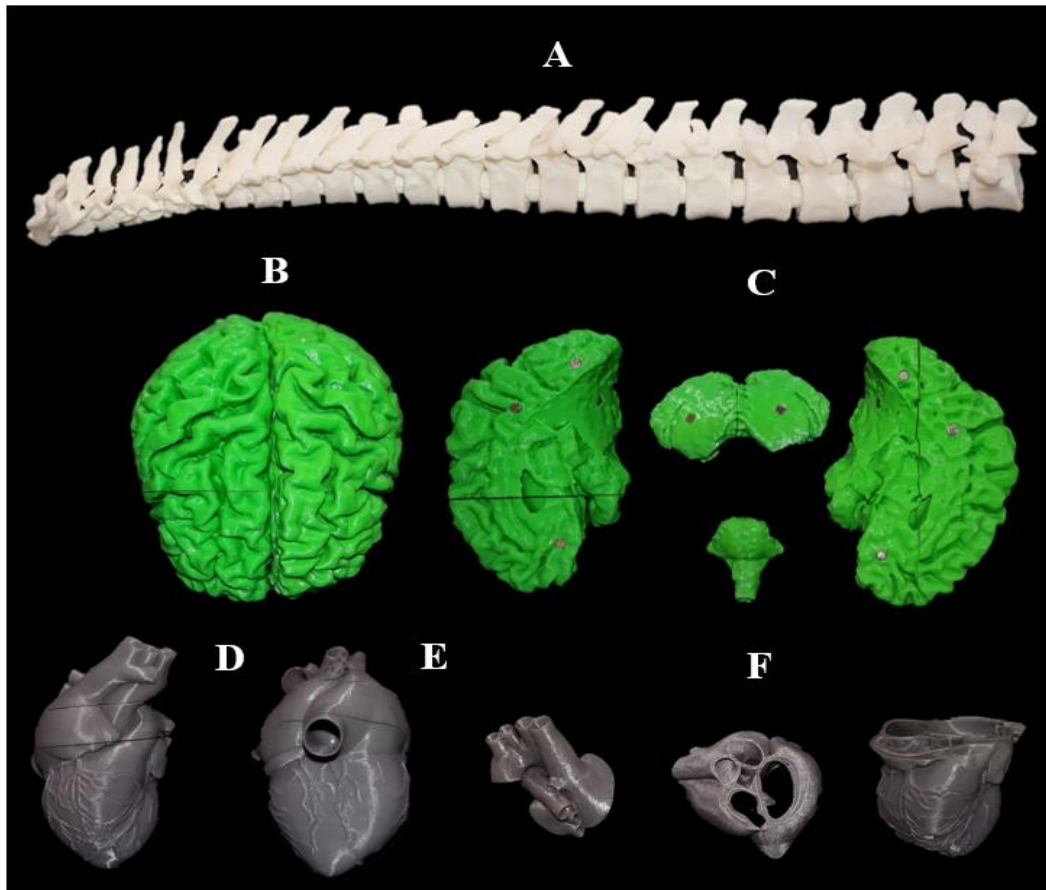


Figura 22.- Diferentes modelos impresos en 3D. **A:** Columna vertebral humana completa, articulada y de tamaño real, **B:** Cerebro humano de tamaño real desmontable, **C:** Cerebro desmontado, **D:** Vista frontal de corazón humano, **E:** Vista posterior de corazón humano. **F:** Corazón desmontado.

Para el prototipado rápido, la construcción y fabricación de biodispositivos, como los descritos en esta memoria, la mejor tecnología que existe es la impresión 3D. Es relativamente económica, los materiales pueden ser biodegradables y son muy resistentes.

Otro ámbito en el que se está invirtiendo mucho es en el de prótesis médicas construidas mediante impresión 3D con materiales biocompatibles. Aunque aún está en desarrollo, es prometedor y se está aplicando con la finalidad de construir prótesis para personas en países sin recursos (Figura 23). También se están construyendo prótesis que ayudan a la rehabilitación de animales como garras y patas para aves que han perdido una extremidad (Galicia et al., 2018).



Figura 23.- A: Prótesis diseñadas por Guillermo Martínez de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid

11. CONCLUSIÓN

La ingeniería aplicada a la Biología reporta beneficios muy importantes, tanto al biólogo como a la enseñanza y la investigación. Aprender programación y unas nociones básicas de electrónica, a parte del beneficio directo, aumenta la destreza para resolver problemas gracias al desarrollo del pensamiento algorítmico. En cuanto a la enseñanza, la propia construcción del biodispositivo y su posterior puesta en marcha, permiten al alumno comprender el funcionamiento desde las partes mínimas del aparato a su resultado global. Esto último, consigue que se aborde una tarea con un determinado dispositivo de forma más eficaz y teniendo claro qué se está haciendo en todo momento. La impresión 3D también es muy útil para construir modelos, que facilitan el aprendizaje de conceptos abstractos o que requieren de una representación tridimensional para su entendimiento. En la investigación, los biólogos necesitamos usar el ingenio frecuentemente, para que los diseños experimentales sean simples y logren tomar las medidas necesarias para conseguir resultados de calidad. Contar con herramientas como los microcontroladores y la impresión 3D es de gran ayuda, ya que son herramientas tremendamente versátiles y se pueden adaptar a cualquier rama de la Biología tal y como se ha demostrado en la presente memoria.

Como se ha demostrado anteriormente, las placas Arduino simplifican la construcción de circuitos electrónicos y por esto, son más asequibles para personas no especializadas en ingeniería. Aunque la electrónica básica es la misma desde hace décadas, la tendencia actual es la simplificación de los procesos de elaboración de un circuito y la programación, favoreciéndose el aprendizaje a todos los niveles. Los aparatos de la empresa Arduino, son un buen ejemplo de lo descrito anteriormente, ya que apuestan por una tecnología modular que permite conectar multitud de sensores con muy pocos cables. Además, estos dispositivos tienen una gran comunidad de usuarios, que están generando a su vez código y ejemplos de aplicaciones de forma constante. Todo esto se complementa con la existencia de una gran diversidad de placas Arduino, que abarca desde unas muy sencillas y económicas hasta otras más potentes capaces de ejecutar programas de *machine learning*.

La simplificación de la programación y la electrónica, estrecha la distancia entre la ingeniería y otras disciplinas. El biólogo debe formarse y entender estas herramientas para ser más eficaz, tanto en la enseñanza como en la investigación.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abe, T., Okamoto, S., Taniguchi, A., Fukui, M., Yamaguchi, A., Utsumi, Y., & Ukita, Y. (2020). A lab in a bento box: An autonomous centrifugal microfluidic system for an enzyme-linked immunosorbent assay. *Analytical Methods*, 12(40):4858–4866. <https://doi.org/10.1039/d0ay01459a>
- Ahamed, M. A., Asraf-Ul-Ahad, M., Sohag, M. H. A., & Ahmad, M. (2016). Development of low cost wireless ECG data acquisition system. *Proceedings of 2015 3rd International Conference on Advances in Electrical Engineering*, 1:72–75. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506799>
- Alexandre Seidowsky, Ève Vilaine, Nicolas Mansencal, Alexandre Ébel, Cédric Villain, Lynda Cheddani, Ziad A. Massy. (2018) Échographie pulmonaire en dialyse Pulmonary ultrasound and dialysis. *Néphrologie & Thérapeutique* 14(1):73-81. <https://doi.org/10.1016/j.nephro.2018.02.013>.
- Aroom, K. R., Harting, M. T., Cox, C. S., Jr, Radharkrishnan, R. S., Smith, C., & Gill, B. S. (2009). Bioimpedance analysis: a guide to simple design and implementation. *The Journal of surgical research*, 153(1):23–30. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2008.04.019>
- Arunachalam, A., & Andreasson, H. (2021). RaspberryPi-Arduino (RPA) powered smart mirrored and reconfigurable IoT facility for plant science research. *Internet Technology Letters*, 1:1–6. <https://doi.org/10.1002/itl2.272>
- Basari, & Agung, M. A. (2018). Wireless ECG Patient Monitoring System Performance Aimed at Off-/On-body Communications. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 1:1000–1004. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597687>
- Bates, H., Zavafer, A., Szabó, M., & Ralph, P. J. (2019). A guide to Open-JIP, a low-cost open-source chlorophyll fluorometer. *Photosynthesis Research*, 142(3):361–368. <https://doi.org/10.1007/s11120-019-00673-2>
- Boubin, M., & Shrestha, S. (2019). Microcontroller Implementation of Support Vector Machine for Detecting Blood Glucose Levels Using Breath Volatile Organic Compounds. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(10):1-9. <https://doi.org/10.3390/s19102283>
- Bravo-Zanoguera, Miguel; Cuevas-González, Daniel; Reyna, Marco A.; García-Vázquez, Juan P.; Avitia, Roberto L. (2020). Fabricating a Portable ECG Device Using AD823X Analog Front-End Microchips and Open-Source Development Validation *Sensors* 20:1-30. <https://doi.org/10.3390/s20205962>
- Carcamo, A. A. C., Reyes, M. G. M., & Urbina, S. M. S. (2019). Low cost Pulse Oximeter using Arduino. *IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON*, 1:1–6. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988029>
- Chaianantakul, N., Wutthi, K., Kamput, N., Pramanpol, N., Janphuang, P., Pummara, W., Phimon, K., & Phatthanakun, R. (2018). Development of mini-spectrophotometer for determination of plasma glucose. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204:670–676. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.107>
- Chen, H., & Markham, J. (2020). Using microcontrollers and sensors to build an inexpensive CO₂ control system for growth chambers. *Applications in Plant Sciences*, 8(10):8–12. <https://doi.org/10.1002/aps3.11393>
- Clifford D. Ferris. (1978). *Introduction to bioinstrumentation*. Editorial The humana press. 330 pp ISBN: 0-89603-000-8
- Conte, B., Landis, W., Boyce, N., Frederick, J., Frederick, L., & Elmer, J. J. (2018). Design and Application of 3D-Printed Photometers Controlled with an Arduino. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(4): 292-300. <https://doi.org/10.1089/3dp.2018.0016>
- Corbellini, S., & Vallan, A. (2014). Arduino-based portable system for bioelectrical impedance measurement. *IEEE MeMeA 2014 - IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications*, Proceedings. 1:1-5 <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2014.6860044>
- Corr PJ, Pickering AD, Gray JA. (1995) Sociability/impulsivity and caffeine-induced arousal: Critical flicker/fusion frequency and procedural learning. *Person. Individ. Diff.* 18(6): 713-730 [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(95\)00001-M](https://doi.org/10.1016/0191-8869(95)00001-M)

- dos Reis, B. R., Easton, Z., White, R. R., & Fuka, D. (2021). A LoRa sensor network for monitoring pastured livestock location and activity1. *Translational Animal Science*, 5(2):1–9. <https://doi.org/10.1093/tas/txab010>
- Duarte, G., Calderon, E. N., Pereira, C. M., Marangoni, L. F. B., Santos, H. F., Peixoto, R. S., Bianchini, A., & Castro, C. B. (2015). A novel marine mesocosm facility to study global warming, water quality, and ocean acidification. *Ecology and Evolution*, 5(20):4555–4566. <https://doi.org/10.1002/ece3.1670>
- Emery Premeaux and Brian Evans. (2011). *Arduino projects to save the world*. Editorial Tecnology in action. 256 pp ISBN: 1-4302-3623-8
- Fahlbusch, J. A., & Harrington, K. J. (2019). A low-cost, open-source inertial movement GPS logger for eco-physiology applications. *Journal of Experimental Biology*, 22(23):1–6. <https://doi.org/10.1242/jeb.211136>
- Foley, C. J., & Sillero-Zubiri, C. (2020). Open-source, low-cost modular GPS collars for monitoring and tracking wildlife. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(4):553–558. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13369>
- Forte, A. J., Huayllani, M. T., Boczar, D., Avila, F. R., Kassis, S., Ciudad, P., Lu, X., Moore, P. A., & McLaughlin, S. A. (2021). Use of bioimpedance spectroscopy for prospective surveillance and early diagnosis of breast cancer-related lymphedema. *Breast disease*, 1:1-9. DOI: 10.3233/BD-201008
- Galicia, C., Hernandez Urraca, V., Del Castillo, L., & Samour, J. (2018). Design and Use of a 3D Prosthetic Leg in a Red-lored Amazon Parrot (*Amazona autumnalis*). *Journal of Avian Medicine and Surgery*, 32(2):133–137. <https://doi.org/10.1647/2017-282>
- Garmendia, O., Rodríguez-Lazaro, M. A., Otero, J., Phan, P., Stoyanova, A., Dinh-Xuan, A. T., Gozal, D., Navajas, D., Montserrat, J. M., & Farré, R. (2020). Low-cost, easy-to-build noninvasive pressure support ventilator for under-resourced regions: open source hardware description, performance and feasibility testing. *The European respiratory journal*, 55(6):1-11 <https://doi.org/10.1183/13993003.00846-2020>
- Goldkorn, R., Naimushin, A., Rozen, E., & Freimark, D. (2020). Early post-stress decrease in cardiac performance by impedance cardiography and its relationship to the severity and extent of ischemia by myocardial perfusion imaging. *BMC Cardiovascular Disorders*, 20(1):1–7. <https://doi.org/10.1186/s12872-020-01639-2>
- Gourzi, M., Rouane, A., Guelaz, R., Alavi, M. S., McHugh, M. B., Nadi, M., & Roth, P. (2005). Non-invasive glycaemia blood measurements by electromagnetic sensor: study in static and dynamic blood circulation. *Journal of medical engineering & technology*, 29(1):22–26. <https://doi.org/10.1080/03091900410001720247>
- Hendee, J., Amornthammarong, N., Gramer, L., & Gomez, A. (2020). A novel low-cost, high-precision sea temperature sensor for coral reef monitoring. *Bulletin of Marine Science*, 96(1):97–109. <https://doi.org/10.5343/bms.2019.0050>
- Hugeng, H., & Kurniawan, R. (2016). Development of the “healthcor” system as a cardiac disorders symptoms detector using an expert system based on arduino uno. *International Journal of Technology*, 7(1), 78–87. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i1.1575>
- James E. Randall. (1987). *Microcomputers and physiological simulation*. Editorial Raven Press. 235 pp ISBN: 0-88167-292-0
- Janpla, S., Kularbphetong, K., & Chuandcham, S. (2019). An automated system for assisting and monitoring plant growth. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* 759:295-404 https://doi.org/10.1007/978-981-13-0341-8_36
- Keenan, E., Shoushtarian, M., & Karmakar, C. K. (2018). Developing STEM skills using Arduino and heart rate variability analysis. *Deakin STEM Education Conference*.1:1-4.
- Kevin Amos, A., Rajalakshmi, T., & Raja, D. (2020). Portable non-invasive glucose and haemoglobin level monitoring incorporated along with multi paramonitoring system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(6):1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/6/062034>

- Khan, S., Kothari, Y., Ramer, M., Vidyadharan, A., & Mercuri, R. (2019). Open Software and Hardware Blood Glucose Analysis as a STEM Project. 2019 9th IEEE Integrated STEM Education Conference, 1(1):91–97. <https://doi.org/10.1109/ISECon.2019.8882092>
- Khan, S., Kothari, Y., Ramer, M., Vidyadharan, A., & Mercuri, R. (2019). Open Software and Hardware Blood Glucose Analysis as a STEM Project. 2019 9th IEEE Integrated STEM Education Conference, ISEC 1:91–97. <https://doi.org/10.1109/ISECon.2019.8882092>
- Khusnul Ain, R. Arif Wibowo, Soegianto Soelistono¹, Lailatul Muniroh, Bayu Ariwanto (2020). Design and development of a low-cost arduino-based electrical bioimpedance spectrometer. Journal of Medical Signals and Sensors, 10(2):125–133. <https://doi.org/10.4103/jmss.JMSS>
- Kyle, U. G., Bosaeus, I., De Lorenzo, A. D., Deurenberg, P., Elia, M., Gómez, J. M., Heitmann, B. L., Kent-Smith, L., Melchior, J. C., Pirlich, M., Scharfetter, H., Schols, A. M., Pichard, C., & Composition of the ESPEN Working Group (2004). Bioelectrical impedance analysis--part I: review of principles and methods. Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland), 23(5):1226–1243. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2004.06.004>
- Manzoni, C., Kia, D. A., Vandrovicova, J., Hardy, J., Wood, N. W., Lewis, P. A., & Ferrari, R. (2018). Genome, transcriptome and proteome: The rise of omics data and their integration in biomedical sciences. Briefings in Bioinformatics, 19(2):286–302. <https://doi.org/10.1093/BIB/BBW114>
- Martín Cuenca, E. (2006). Fundamentos de la fisiología. Editorial Thomson. 776 pp ISBN: 84-9732-340-8
- Martín Cuenca, E., Angulo Usategui, J. M^a. y Angulo Martínez, I. (1997). Microcontroladores PIC, la solución en un CHIP. Editorial Paraninfo. 489 pp ISBN: 84-283-2371-2
- Memon, S., Soothar, K., Memon, K., Magsi, A., Laghari, A., Abbas, M., & Ain, N. (2018). The Design of Wireless Portable Electrocardiograph Monitoring System Based on ZigBee. ICST Transactions on Scalable Information Systems, 7(28):1-8. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164558>
- Miron-Alexe, V. (2020). IoT pulse oximetry status monitoring for home quarantined COVID-19 patients. Journal of Science and Arts, 20(4):1029–1036. <https://doi.org/10.46939/j.sci.arts-20.4-c04>
- Monkovic, J. M., Jones, S. M., Nicolas, M., Katyal, P., Punia, K., Noland, D., & Montclare, J. K. (2021). From concept to reality: the use and impact of 3D prints as academic tools for high school biology education. Journal of Biological Education, 1:1–13. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1858927>
- Mumtaz, R., Zaidi, S. M. H., Shakir, M. Z., Shafi, U., Malik, M. M., Haque, A., Mumtaz, S., & Zaidi, S. A. R. (2021). Internet of things (Iot) based indoor air quality sensing and predictive analytic—a covid-19 perspective. Electronics (Switzerland), 10(2):1–26. <https://doi.org/10.3390/electronics10020184>
- Ogrutan, P. L. (2017). Increasing students' interest by encouraging them to create original lab projects. TEM Journal, 6(4):653–659. <https://doi.org/10.18421/TEM64-02>
- Oliveira, V. K., Camargo, B. D., Alexandrino, F., Morello, L. G., Marchini, F. K., Aoki, M. N., & Blanes, L. (2021). A low-cost PCR instrument for molecular disease diagnostics based on customized printed circuit board heaters. Biomedical Microdevices, 23(2):1–8. <https://doi.org/10.1007/s10544-021-00563-2>
- Padmini, S., Shafeulwara, M. D., Sharmini, K. S., Mridula, V., Kar, I., & Raj, K. (2019). Development of pulse oximeter for heart rate monitoring. AIP Conference Proceedings, 2117:1-6. <https://doi.org/10.1063/1.5114589>
- Palmara, G., Frascella, F., Roppolo, I., Chiappone, A., & Chiadò, A. (2021). Functional 3D printing: Approaches and bioapplications. Biosensors and Bioelectronics, 175:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112849>
- Pande, P., Thit, A., Sørensen, A. E., Mojsoska, B., Moeller, M. E., & Jepsen, P. M. (2021). Long-term effectiveness of immersive vr simulations in undergraduate science learning: Lessons from a media-comparison study. Research in Learning Technology, 29:1–24. <https://doi.org/10.25304/rlt.v29.2482>
- Piechnik, D. A., Mulcahy, M. P., & Cumberland, B. (2017). STEM Technology Applied to Biology Labs : Quantifying Cellular Respiration with Sensors and Arduino Microcontroller Technology. Proceedings of the Association for Biology Laboratory Education, 38:1-25.

- Poh, J.-J., Goh, N. W.-J., Tan, S. M.-X., & Gan, S. K.-E. (2021). Spectrophotometer on-the-go: the development of a 2-in-1 uv-vis portable arduino-based spectrophotometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 325:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112698>
- Rianmora, S., Ridwan, I. I. Z., & Ravendran, A. (2020). Design and development of an intelligent irrigation system for thailand: A kansei engineering based approach. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 25(1):1-11. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/176591/163687>
- Rivas-Sánchez, Y. A., Moreno-Pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. (2019). Environment control with low-cost microcontrollers and microprocessors: Application for green walls. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3):1-7 <https://doi.org/10.3390/su11030782>
- Robert E. Keen and James D. Spain. (1992). Computer simulation in biology, a BASIC Introduction. Editorial WILEY-LISS. 516 pp ISBN: 0-471-50971-X
- Sadegh-Cheri, M. (2020). SeparateDuino: Design and Fabrication of a Low-Cost Arduino-Based Microcentrifuge Using the Recycled Parts of a Computer DVD Drive. *Journal of Chemical Education*, 97(8):2338-2341. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00107>
- Santoso, G., Hani, S., Kristiyana, S., & Saputra, Y. A. (2019). Design Non-Invasive of Blood Sugar Detector Prototypes Using Cellular Technology GPS-Based. *Journal of Physics: Conference Series*, 1381:1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1381/1/012032>
- Schmitt, M. A., Friedrich, O., & Gilbert, D. F. (2019). Portoporator ©: A portable low-cost electroporation device for gene transfer to cultured cells in biotechnology, biomedical research and education. *Biosensors and Bioelectronics*, 131:95-103. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.02.024>
- Shrestha, S., Harold, C., Boubin, M. & Lawrence L. (2019). Smart wristband with integrated chemical sensors for detecting glucose levels using breath volatile organic compounds, *Proc. Smart Biomedical and Physiological Sensor Technology XVI*, 1:1-8 <https://doi.org/10.1117/12.2521365>
- Sulaeman, M. Y., & Widita, R. (2015). Simple Arduino based pulse generator design for electroporation. *AIP Conference Proceedings*, 1677:1-5. <https://doi.org/10.1063/1.4930764>
- Sunny, S., & Kumar, S. S. (2018). Optical based non invasive glucometer with IoT. *EPSCICON 2018 - 4th International Conference on Power, Signals, Control and Computation*, 1:1-3. <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2018.8379597>
- Sutar, N., Parihar, M., Ijare, R., & Gowari, K. (2016). Design and development of SMD based wearable pulse oximeter. *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 1:1812-1816*. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754480>
- Tiam Kapen, P., Kouam Kouam, S. U., Tchatchouang Tchoupo, C. B., & Tchuen, G. (2020). Theoretical and experimental investigation of a portable electrocardiograph adapted for low-income countries. *Health and Technology*, 10(5):1173-1180. <https://doi.org/10.1007/s12553-020-00432-7>
- Wong, G., Wong, I., Chan, K., Hsieh, Y., & Wong, S. (2015). A rapid and low-cost PCR thermal cycler for low resource settings. *PLOS one*, 10(7):1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131701>
- Yang, B., Patsavas, M. C., Byrne, R. H., & Ma, J. (2014). Seawater pH measurements in the field: A DIY photometer with 0.01 unit pH accuracy. *Marine Chemistry*, 160:75-81. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.01.005>
- Yuniati, A., & Rifai, R. (2019). Study of simple spectrophotometer design using LDR sensors based on arduino uno microcontroller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1):1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012099>
- Zuckerberg, J., Shaik, M., Widmeier, K., Kilbaugh, T., & Nelin, T. D. (2020). A lung for all: Novel mechanical ventilator for emergency and low-resource settings. *Life Sciences* 257:1-7 <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118113>