

Laboratorios virtuales aplicados a la Física universitaria: situación actual y perspectivas futuras

Virtual laboratories applied to university Physics: current situation and future scenarios

Carlos del Blanco Alegre, Ana Isabel Calvo Gordaliza y Roberto Fraile Laiz
cblaa@unileon.es, aicalg@unileon.es, rfral@unileon.es

Departamento de Química y Física Aplicadas, Universidad de León

Resumen- El presente trabajo trata del estado actual de las herramientas aplicables a las prácticas de laboratorio en las asignaturas universitarias de Física. La situación causada por la pandemia provocada por el coronavirus SARS-CoV-2 ha provocado la proliferación de empresas que desarrollan laboratorios virtuales y el desarrollo de múltiples herramientas, gratuitas o no, aplicables a las prácticas online. Este trabajo recoge una descripción de las principales herramientas disponibles. Además, se comparan los resultados de una misma práctica realizada de modo online y presencial sobre la ley de Stokes. Se ha observado que ambos modos presentaron similares resultados académicos, con un menor tiempo de práctica y un menor coste asociado para la práctica online. Por último, se incluye una reflexión sobre la futura aplicación de prácticas virtuales 3D y su utilización conjunta con prácticas presenciales.

Palabras clave: enseñanza telemática, prácticas de laboratorio, recursos TIC

Abstract- This work deals with the current state of the art of tools applicable to the laboratory practices in the university subjects of Physics. The situation caused by the SARS-CoV-2 coronavirus has triggered the number of companies that develop virtual laboratories and the development of multiple tools, free or not, applicable to online practices. A description of the main tools available is included. In addition, the results of the same practice carried out online and on-site on Stokes's law are compared. It has been observed that both modes presented similar academic results, with a shorter duration and a lower associated cost for online practice. Finally, a reflection on the future application of 3D virtual practices and their joint use with on-site practices is included.

Keywords: ICT resources, laboratory practices, telematic teaching

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en educación ha crecido exponencialmente en los últimos años, agravado por situaciones como la pandemia provocada por el coronavirus SARS-CoV-2, haciendo de las clases virtuales una constante (Hoofman & Secord, 2021). Las TIC permiten al alumno y al docente acceder de manera instantánea a una gran cantidad de

información actualizada, que puede aplicarse a las prácticas de laboratorio de Física. Durante la pandemia, en todos los niveles educativos, la mayoría de los docentes se enfrentaron a problemas para crear materiales educativos interactivos y realizar una evaluación (Herrera Castrillo, 2021). Esto tuvo una clara repercusión en los alumnos que, en ocasiones, se encontraron con recursos limitados para el aprendizaje en línea o dificultades en el acceso a dichos recursos (Mukuka, Shumba, & Mulenga, 2021; Munastiwi & Puryono, 2021).

La enseñanza de la Física es básica en múltiples grados universitarios tanto de Ingeniería como de Ciencias. Además, según el Real Decreto 1105/2014, que regula el currículo básico de la ESO y Bachillerato, es una de las asignaturas troncales de los alumnos previo ingreso a la carrera universitaria.

Cabe resaltar el importante papel ocupado por los laboratorios en la asignatura, pues en ellos los estudiantes pueden aplicar sus conocimientos teóricos a situaciones prácticas. Sin embargo, ya sea por la “no presencialidad” o por el estado de los laboratorios educativos universitarios, en ocasiones no se pueden visualizar determinados fenómenos físicos.

Por otra parte, se hace necesaria la adaptación de la enseñanza a los tiempos presentes, influidos por restricciones de movilidad, con el consiguiente incremento de la docencia telemática. Esta situación de “no presencialidad” dificulta la docencia mediante prácticas, donde la presencialidad es fundamental. Por ello, en los últimos tiempos se han desarrollado y utilizado diferentes herramientas telemáticas que permiten la realización de prácticas universitarias relacionadas con la Física.

Una de las tecnologías emergentes que trata de superar esos obstáculos son los laboratorios virtuales, un entorno virtual con simulaciones utilizadas para reproducir los fenómenos reales (Yarden & Yarden, 2010). Estos incluyen gráficos por ordenador, realidad aumentada, dinámica computacional y mundos virtuales (Potkonjak et al., 2016). Sanz & Martínez (2005) definen los laboratorios virtuales como una simulación

de la realidad, un experimento de laboratorio usando las leyes descubiertas por la ciencia. Estas leyes son codificadas por el procesador de un ordenador para que, mediante algunas órdenes, éste nos brinde respuestas semejantes a lo que se podría obtener en la vida real.

Los principales inconvenientes (Cabrera Medina & Sanchez Medina, 2016; Nedic, Machotka, & Nafalski, 2003) de los laboratorios virtuales son: i) la posibilidad de que el alumno se convierta en espectador, por lo que se debe acompañar la práctica de un guion; ii) la pérdida parcial de la realidad de la práctica; iii) la imposibilidad de sustituir totalmente la experiencia enriquecedora de los laboratorios presenciales.

La aplicación de metodologías mixtas (presencial más virtual) puede ser una alternativa a la falta de ciertas prácticas de laboratorio y permitir así al alumno familiarizarse con ciertos fenómenos físicos. Un ejemplo de aplicación de laboratorios virtuales con gran éxito por parte de una institución universitaria es la llevada a cabo por la Universidad Politécnica de Madrid (<https://3dlabs.upm.es/index.php>) con aplicaciones, por ejemplo, en el campo de la Biología o Topografía (Benito Oterino et al., 2019). Además, una propuesta de metodología para desarrollar laboratorios virtuales e incorporarlos a las prácticas puede encontrarse en Cabrera Medina & Sanchez Medina (2016). Existen varios estudios de laboratorios virtuales implementados con éxito en el ámbito de la Ingeniería y Química (Domingues, Rocha, Dourado, Alves, & Ferreira, 2010; Dormido et al., 2008; Jordá, 2013; Potkonjak et al., 2016).

La aplicación de tales herramientas puede servir tanto en niveles universitarios como en niveles previos. Con ello, se consigue una cadena de construcción del conocimiento, tanto teórico como práctico en los alumnos, especialmente en situaciones forzadas de no presencialidad. Además, las prácticas virtuales fomentan el trabajo autónomo de los alumnos, tal y como promueven algunos programas de acreditación (Accreditation Board for Engineering and Technology, 2008) y favorecen el aprendizaje de TIC por parte de los alumnos.

2. CONTEXTO

El curso 2020/2021, desarrollado en parte de manera telemática en la docencia universitaria, ha puesto de manifiesto la necesidad de una recopilación de las herramientas disponibles online en relación con las prácticas de laboratorio de Física, una asignatura notablemente aplicada. Así pues, el objetivo principal del presente trabajo es realizar una selección de las principales herramientas disponibles para la creación de prácticas de laboratorio telemáticas aplicadas al campo de la Física universitaria.

El público objetivo será:

- por una parte, el personal docente para la realización de guiones de prácticas de laboratorio telemáticas y,
- por otra parte, el alumnado interesado en un aprendizaje autónomo o complementario al adquirido en laboratorios reales.

Además, se espera que la aplicación de las herramientas disponibles mejore el ambiente en las aulas e incremente el compromiso del alumno en su aprendizaje.

3. DESCRIPCIÓN

La metodología llevada a cabo ha consistido en la búsqueda activa de recursos online (tanto en castellano como en inglés) aplicables a las prácticas de laboratorio de Física, principalmente de acceso gratuito. En los laboratorios virtuales, basados en simulación, el usuario no interactúa con equipos reales, sino con un software de simulación y emulación de dispositivos. Este software puede estar incorporado en el servidor (y se accede a él mediante una página web) o bien ser descargado por el usuario. Así pues, los laboratorios virtuales están incluidos en los llamados Entornos Virtuales de Aprendizaje (EVA) o *Virtual Learning Environment* (VLE).

Se ha realizado una práctica del cálculo de la viscosidad de un fluido mediante la aplicación de la Ley de Stokes, en los Grados de Biotecnología, Ciencias Ambientales y Veterinaria de la Universidad de León. Previamente, se entregó a los alumnos el guion de la práctica. Unos alumnos realizaron la práctica de manera presencial, y otros de manera virtual. Todos ellos elaboraron una memoria de la práctica realizada, que fue finalmente evaluada.

Con el fin de evaluar inicialmente la metodología presencial y virtual, se han comparado las calificaciones de las entregas realizadas por los alumnos.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se enumeran los principales enlaces con herramientas aplicables a prácticas de laboratorio online de nivel universitario en el campo de la Física. Tal y como se ha observado en otros trabajos durante los últimos 20 años, la aplicación de laboratorios virtuales en la enseñanza de la Física ha proporcionado resultados satisfactorios (Harms, 2000; Oidov, Tortogtokh, & Purevdagva, 2012).

Tabla 1. Listado de enlaces con herramientas aplicables a prácticas de laboratorio online en el campo de la Física.

Organización	Enlace
Educaplus	https://www.educaplus.org/games/fisica
Phet-Universidad de Colorado	https://phet.colorado.edu/es
Universidad del País Vasco	http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3
Edumedia	https://www.edumedia-sciences.com/es/node/61-fisica
Vascak	https://www.vacak.cz
VirtualLabs	https://www.vlab.co.in/broad-area-physical-sciences
The Physics classroom	https://www.physicsclassroom.com/Physics-Interactives
App de Física Walter Fend	https://www.walterfendt.de/html5/phes/
Go-Lab	https://www.golabz.eu/
Cienytec (pago)	https://www.cienytec.com
Praxilabs (pago)	https://praxilabs.com

A continuación, se describirán brevemente los enlaces gratuitos mencionados en la Tabla 1:

- Educaplus: página web desarrollada por Jesús Peñas, profesor de Física y Química que incluye applets de Cinemática, Dinámica, Energía, Termodinámica, Electroestática, Ondas y Cuántica.
- Phet: simulaciones interactivas desarrolladas por la Universidad de Colorado Boulder en múltiples campos de la enseñanza. Se trata de uno de los enlaces más conocidos, actuales y de calidad para la utilización de simulaciones de experimentos online. Incluye experimentos relacionados con el movimiento, Sonido y Ondas, Trabajo, Energía, Potencia, Calor y Termoelectricidad, Fenómenos Cuánticos, Luz, Radiación, Electricidad y Magnetismo.
- Curso Interactivo de Física en Internet: desarrollado por Ángel Franco de la Universidad del País Vasco. Incluye una parte teórica, ejercicios de aplicación y applets, que hacen de este curso una referencia para estudiantes de primer año. Incluye actividades, entre otras, de unidades y medidas, Cinemática, Dinámica, Oscilaciones, Movimiento Ondulatorio, Fluidos, Campo Eléctrico y Magnético, y Mecánica Cuántica.
- Edumedia: compendio de recursos relacionados con la Física, con applets simples, pero útiles, para completar prácticas presenciales. Incluye actividades de Mecánica, Óptica y Ondas, Electricidad y Calor.
- Vascak: página web desarrollada por el profesor Vladimír Vaščák, que incluye múltiples animaciones físicas en prácticamente todos los campos de aplicación. El principal inconveniente que presenta es el idioma, ya que la traducción a castellano/inglés en ocasiones es incorrecta.
- VirtualLabs: compilación de laboratorios virtuales desarrollados por el Ministerio de Educación de la India, con aplicación en Óptica, Termodinámica, Mecánica y Electricidad y Magnetismo, entre otras. Presenta un desarrollo teórico en inglés previo a la actividad, así como problemas de aplicación. Requiere autenticación mediante correo electrónico.
- The Physics room: compendio de experimentos físicos interactivos en múltiples campos de la Física como Óptica, Magnetismo, Electricidad, Cinemática o Mecánica. En cada apartado existen varios experimentos y ejercicios para resolver, lo que favorece la realización de actividades por parte de los alumnos.
- Walter Fend: página web desarrollada por W. Fend que incluye experimentos sobre Mecánica, Oscilaciones y Ondas, Electrodinámica, Óptica y Termodinámica, entre otras. Consiste en sencillos experimentos, pero, a su vez, muy didácticos y fáciles de entender.
- Go-Lab: proyecto cofinanciado por la Unión Europea, compuesto por 18 organizaciones de 12 países. Ofrece múltiples experimentos de Física y Química para uso a gran escala en educación (Jong, Sotiriou, & Gillet, 2014).

Dos de las herramientas de la Tabla 1, la de la Universidad del País Vasco y la de la Universidad de Colorado, se utilizaron

para determinar el coeficiente de viscosidad de dos fluidos a través de la aplicación de la ley de Stokes. Se trata del clásico experimento consistente en lanzar una esfera pesada en un fluido y medir el tiempo que tarda en recorrer una determinada distancia, obteniendo así la velocidad terminal de la bola y permitiendo el cálculo de la viscosidad del fluido. Para la práctica presencial se requiere diverso material: probetas, esferas de plomo, imán, fluidos (por ejemplo, glicerina y detergente), cronómetro y regla o cinta métrica.

A continuación, se muestra la comparación de los resultados de los alumnos (219 en total) al realizar la misma práctica, con los mismos conceptos físicos y cálculos a realizar, de manera online y presencial en los cursos 2019/2020 y 2020/2021. Se han comparado 4 grupos de alumnos: i) grado en Biotecnología en modalidad online con 52 alumnos; ii) grado en Ciencias Ambientales en modalidad presencial con 59 alumnos; iii) grado en Veterinaria online con 15 alumnos; y iv) grado en Veterinaria presencial con 93 alumnos.

Tanto en la modalidad presencial como en online, el alumno debía realizar la práctica y entregar un informe, en el cual se les entregaban tablas para rellenar con los resultados obtenidos en la práctica. Dicho informe constaba de 3 partes (variación de la presión con la profundidad, determinación la densidad de un líquido y determinación de la viscosidad de un fluido) y se valoró con una nota de 0 a 10 en función del resultado final obtenido, la correcta utilización de las cifras significativas y las unidades.

En las prácticas presenciales, el profesor comenzaba la clase explicando los conceptos básicos de estática de fluidos apoyándose en el Curso Interactivo de Física en Internet, después se explicaba la ley de Stokes y se realizaba el lanzamiento de las esferas en el fluido. Una vez obtenidos los datos de la práctica, los alumnos calculaban los resultados para completar el informe. En las prácticas online, el docente se apoyaba en el Curso Interactivo de Física en Internet y en las simulaciones interactivas Phet, siguiendo el mismo procedimiento que presencialmente. En la Figura 1 se muestran los applets utilizados en la práctica, para la explicación previa de conceptos básicos de la dinámica de fluidos. En primer lugar, se explica la ecuación de continuidad de fluidos a partir del movimiento de un fluido en una tubería. Posteriormente se simula el lanzamiento de una esfera de plomo en un tanque lleno de fluido (glicerina, en nuestro caso).

La Figura 2 muestra los histogramas de notas obtenidas por los cuatro grupos. La nota media más alta fue la obtenida por el grupo de Biotecnología online con $9,28 \pm 0,97$, seguido de Veterinaria, independientemente de la modalidad ($8,86 \pm 1,73$ y $8,84 \pm 1,39$ de manera presencial y online, respectivamente). Cabe resaltar que el porcentaje de no presentados en los grupos online fue muy similar al de los grupos presenciales (7,4 % vs 9,9 %) y que la duración de la práctica se redujo de dos horas presencialmente a una hora y media online.

Los errores más frecuentes en la práctica son comunes en ambas modalidades, y corresponden con dificultades al realizar el análisis dimensional y la utilización de las unidades correctas. Por ello, la combinación de las calificaciones obtenidas junto con el análisis de los errores, permite afirmar que, en este caso, el VLE fue efectivo en prácticas de laboratorio de Física.

La situación sanitaria actual y prevista, hace presagiar que en los próximos años se realizarán prácticas presenciales con la utilización de medios virtuales, debido a la falta de material en

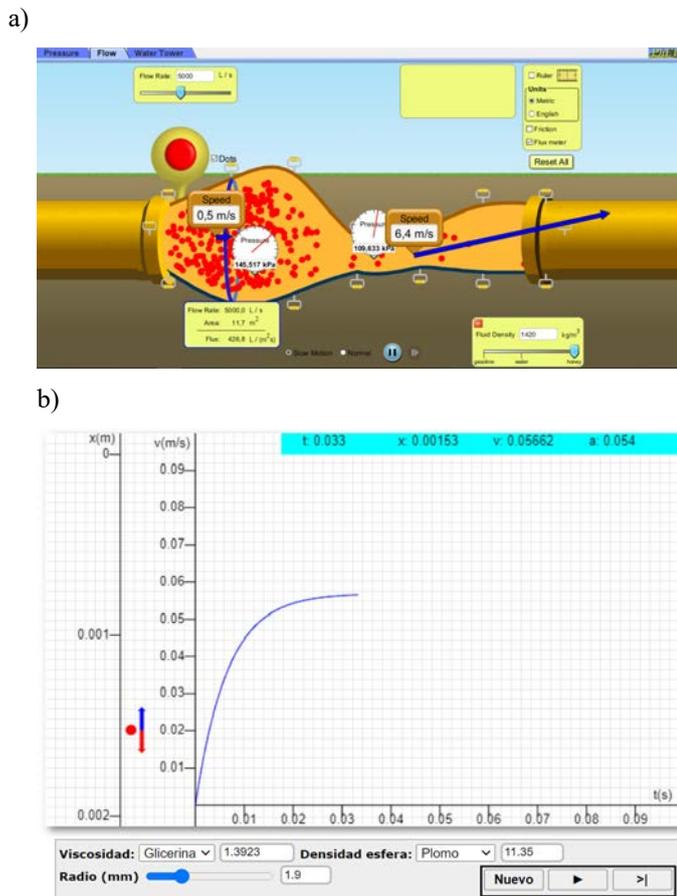


Figura 1. Imágenes de las applets disponibles en: a) <https://phet.colorado.edu/es/> sobre el movimiento de un fluido a lo largo de una conducción y; b) <http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica3/> sobre el movimiento de un sólido en un fluido.

algunos casos (Heradio et al., 2016). Esta metodología mixta puede verse mejorada con simples mejoras estéticas de las herramientas online, con una apariencia 3D de los objetos y una sensación de laboratorio presencial para el alumno.

Un ejemplo de esta apariencia se muestra en la Figura 3, donde se representa una probeta con el fluido que seleccionemos y permite el lanzamiento de la bola para la determinación del coeficiente de viscosidad por la Ley de Stokes. Actualmente, estos recursos más llamativos para el alumno y que, en consecuencia, pueden mejorar su aprendizaje, son suministrados por empresas privadas, previo pago. Consideramos que en los próximos años las universidades deberán incluir suscripciones a tales prácticas virtuales para mejorar la calidad de la docencia práctica, además de estar preparadas para situaciones de no presencialidad. Asimismo, existe la necesidad de que existan o se desarrollen más herramientas de este tipo, pero gratuitas. Así pues, la investigación en laboratorios virtuales actualmente es un campo muy activo, donde la producción científica se ha incrementado exponencialmente en los últimos años a la par del crecimiento en la calidad de la docencia universitaria (Salmerón-Manzano & Manzano-Agugliaro, 2018).

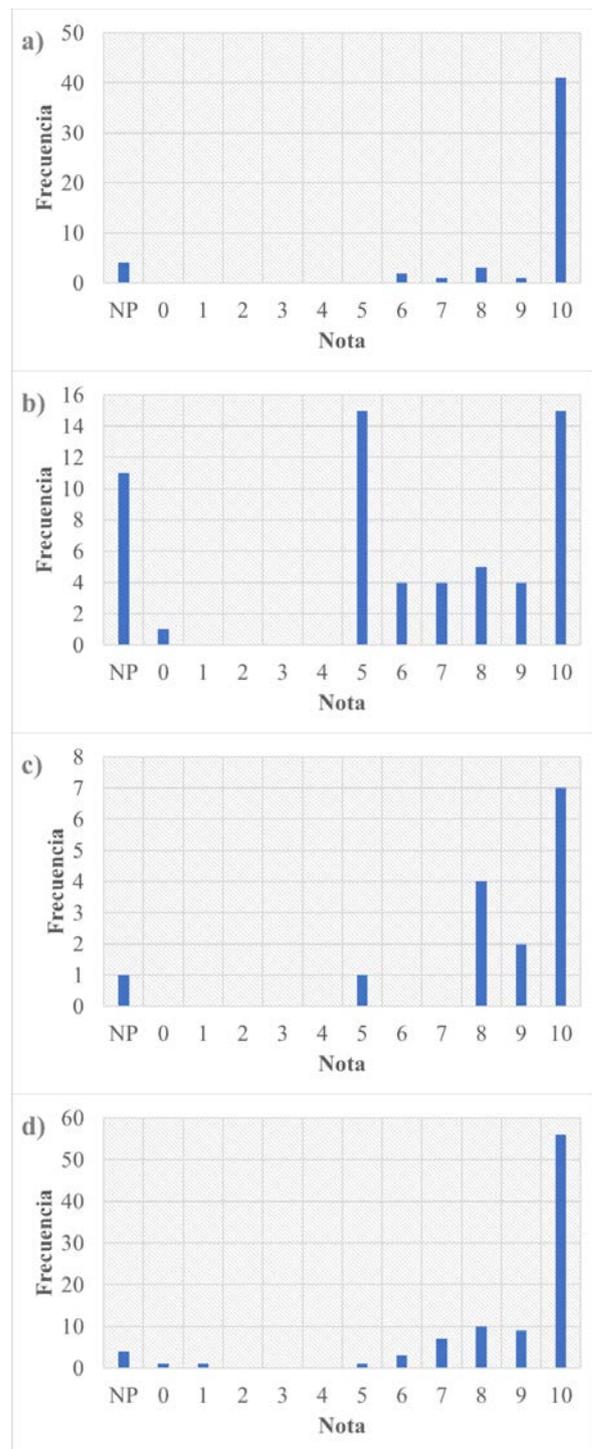


Figura 2. Histograma de notas obtenidas por los alumnos de: a) Biotecnología online; b) Ciencias Ambientales presencial; c) Veterinaria online; y d) Veterinaria presencial.

Sin embargo, la combinación de prácticas presenciales y realidad aumentada no ha mostrado resultados consistentes, ya que dependiendo del estudio se han observado mejoras o no en los resultados de los alumnos (Ínce et al., 2015; Thees et al., 2020) por lo tanto debe ser estudiado en profundidad en el futuro.



Figura 3. Captura de la práctica para la determinación del coeficiente de viscosidad por la Ley de Stokes proporcionada por <https://praxilabs.com/>.

Desde el punto de vista económico, cabe resaltar que la metodología mixta puede incluso reducir costes de laboratorio, tanto de material como de personal y facilitar la realización de prácticas cuya presencialidad provocaría importantes desembolsos económicos y que, por ello, en muchas ocasiones no se realizan.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han descrito algunas de las principales herramientas existentes para la creación de prácticas de laboratorio telemáticas aplicadas al campo de la Física universitaria. Se ha observado un número creciente de ellas en los últimos años y el desarrollo de herramientas de pago con mayor nivel de realidad. Asimismo, en este trabajo se ha tratado la aplicación de varias de estas herramientas virtuales en prácticas online de Física universitaria, que ha resultado ser satisfactoria porque no se han observado diferencias sustanciales entre los grupos presenciales y telemáticos. Además, se ha reducido el porcentaje de no asistencia a las prácticas.

A pesar de que la propuesta de combinación de prácticas mixtas (presencial y online) no ha sido aún evaluada estadísticamente en diferentes grupos, pensamos que puede ser una oportunidad de aprovechar los medios disponibles actuales online y así fomentar el interés de los alumnos en las prácticas de laboratorio en Física. La incorporación paulatina de métodos y procedimientos experimentales virtuales permitirá que el alumno tenga acceso a procedimientos prácticos en cualquier momento, facilitando la organización personal del alumno y contribuyendo al esclarecimiento de los conceptos. Por último, la metodología mixta puede permitir la realización de prácticas muy caras e incluso reducir costes de laboratorio, por lo que la perspectiva futura es la aplicación de dichas metodologías a nivel universitario independientemente de la situación pandémica, ya que permite hacer prácticas que, debido a la falta de material, no se podrían hacer de manera presencial.

AGRADECIMIENTOS

Carlos del Blanco Alegre agradece la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU16/05764) del Ministerio de Educación.

REFERENCIAS

- Accreditation Board for Engineering and Technology. 2008. Criteria for accrediting engineering programs. Baltimore: ABET Inc.
- Benito Oterino, J. M., Fernández-Avilés Pedraza, D., Martínez Peña, M., Salazar Calderón, J. C., Sánchez Rupérez, A., & Chueca Castedo, R. M. 2019. Laboratorio virtual para autoaprendizaje en ingeniería. Taquimetría en TOPLAB, LV de observaciones topográficas UPM. In Aprendizaje, Innovación y Cooperación como impulsores del cambio metodológico (pp. 462–467). Zaragoza: Servicio de Publicaciones Universidad. <http://doi.org/10.26754/CINAIC.2019.0095>
- Cabrera Medina, J. M., & Sanchez Medina, I. I. 2016. Laboratorios virtuales de física mediante el uso de herramientas disponibles en la Web. Memorias de Congresos UTP, 1(1), 49–55. Retrieved from <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1296/html>
- Domingues, L., Rocha, I., Dourado, F., Alves, M., & Ferreira, E. C. 2010. Virtual laboratories in (bio)chemical engineering education. *Education for Chemical Engineers*, 5(2), 22–27. <http://doi.org/10.1016/j.ece.2010.02.001>
- Dormido, S., Vargas, H., Sánchez, J., Dormido, R., Duro, N., Dormido-Canto, S., & Morilla, F. 2008. Developing and Implementing Virtual and Remote Labs for Control Education: The UNED pilot experience. *IFAC Proceedings Volumes (Vol. 41)*. IFAC. <http://doi.org/10.3182/20080706-5-kr-1001.01378>
- Harms, U. 2000. Virtual and remote labs in physics education. 2nd European Conference on Physics Teaching in Engineering Education, 140–146.
- Heradio, R., De La Torre, L., Galan, D., Cabrerizo, F. J., Herrera-Viedma, E., & Dormido, S. 2016. Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers and Education*, 98, 14–38. <http://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>
- Herrera Castrillo, C. J. 2021. Aprendizaje en las asignaturas “Electricidad” y “Termodinámica y Física Estadística” en tiempos de pandemia. *Revista Multi-Ensayos*, 7(13), 14–25. <http://doi.org/10.5377/multiensayos.v7i13.10748>
- Hoofman, J., & Secord, E. 2021. The Effect of COVID-19 on Education. *Pediatric Clinics of North America*, 1–33. <http://doi.org/10.1016/j.pcl.2021.05.009>
- İnce, E., Kırbaşlar, F. G., Güneş, Z. Ö., Yaman, Y., Yolcu, Ö., & Yolcu, E. 2015. An Innovative Approach in Virtual Laboratory Education: The Case of “IUVIRLAB” and Relationships between Communication Skills with the Usage of IUVIRLAB. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1768–1777. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.377>

- Jong, T. De, Sotiriou, S., & Gillet, D. 2014. Innovations in STEM education: the Go-Lab federation of online labs. *Smart Learning Environments* Volume, 1(3), 1–16.
- Jordá, J. M. M. 2013. Virtual Tools: Virtual Laboratories for Experimental science – An Experience with VCL Tool. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 106, 3355–3365. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.388>
- Mukuka, A., Shumba, O., & Mulenga, H. M. 2021. Students' Experiences with Remote Learning during the COVID-19 School Closure: Implications for Mathematics Education. *Heliyon*, e07523. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07523>
- Munastiwi, E., & Puryono, S. 2021. Unprepared management decreases education performance in kindergartens during Covid-19 pandemic. *Heliyon*, 7(5), e07138. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07138>
- Nedic, Z., Machotka, J., & Nafalski, A. 2003. Remote laboratories versus virtual and real laboratories. *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, 1, T3E1-T3E6. <http://doi.org/10.1109/FIE.2003.1263343>
- Oidov, L., Tortogtokh, U., & Purevdagva, E. 2012. Virtual laboratory for physics teaching. 2012 International Conference on Management and Education Innovation, 37, 319–323. Retrieved from <http://www.ipedr.com/vol37/062-ICMEI2012-E10015.pdf>
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. 2016. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers and Education*, 95, 309–327. <http://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Salmerón-Manzano, E., & Manzano-Agugliaro, F. 2018. The higher education sustainability through virtual laboratories: The Spanish University as case of study. *Sustainability* (Switzerland), 10(11). <http://doi.org/10.3390/su10114040>
- Sanz, A., & Martínez, J. 2005. El uso de los laboratorios virtuales en la asignatura Bioquímica como alternativa para la aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación. *Tecnología Química*, 25(1), 5–17.
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P., & Kuhn, J. 2020. Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <http://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Yarden, H., & Yarden, A. 2010. Learning using dynamic and static visualizations: Students' comprehension, prior knowledge and Conceptual Status of a biotechnological method. *Research in Science Education*, 40(3), 375–402. <http://doi.org/10.1007/s11165-009-9126-0>