

## DESARROLLO DE LABORATORIOS VIRTUALES DE ESTRUCTURAS

Martínez, Santiago<sup>a</sup>; Gómez, Daniel<sup>b</sup>; Ortiz, Albert R.<sup>c</sup>; Villamizar, Sandra<sup>d</sup>;  
Ingeniero civil, PhD<sup>bcd</sup>  
Universidad Del Valle.

[santiago.sandoval@correounivalle.edu.co](mailto:santiago.sandoval@correounivalle.edu.co)

### RESUMEN

La práctica experimental es fundamental para que los estudiantes consoliden su conocimiento y lo apliquen en situaciones reales, lo que es esencial para desarrollar habilidades sólidas en la aplicación práctica de los conceptos aprendidos. Tradicionalmente, los laboratorios convencionales han sido el único espacio disponible para impartir la componente práctica de los cursos; sin embargo, con el continuo desarrollo de las TICs, las instituciones educativas han comenzado a adoptar modelos educativos mucho más flexibles, en los que no es necesario contar con un espacio físico. Por lo tanto, en esta investigación se diseñaron y desarrollaron laboratorios virtuales de ingeniería estructural accesibles que permiten la práctica experimental de manera simultánea y a distancia. Los resultados de los laboratorios se validaron mediante un análisis comparativo con datos obtenidos de modelos analíticos construidos en Matlab y SAP2000. Los laboratorios virtuales redujeron los costes asociados al uso de laboratorios convencionales y, al mismo tiempo, contribuyeron a la modernización pedagógica en las clases de ingeniería, fomentando así el aprendizaje autónomo y facilitando la comprensión de conceptos.

### ABSTRACT

*Experimental practice is fundamental for students to consolidate their knowledge and apply it in real-world situations, which is essential for developing strong skills in the practical application of learned concepts. Traditionally, conventional laboratories have been the only available space for imparting the practical component of courses. However, with the continuous development of ICTs, educational institutions have begun to adopt much more flexible educational models that do not require a physical space. Therefore, in this research, accessible virtual structural engineering laboratories were designed and developed to allow for simultaneous and remote experimental practice. The results of these laboratories were validated through a comparative analysis with data obtained from analytical models constructed in Matlab and SAP2000. The virtual laboratories reduced the costs associated with the use of conventional laboratories while simultaneously contributing to pedagogical modernization in engineering classes, thus promoting autonomous learning and facilitating the understanding of concepts.*

Organiza:

## INTRODUCCIÓN

Las prácticas experimentales son una parte fundamental en la formación de los ingenieros. Son necesarias para apoyar los procesos de enseñanza-aprendizaje y contribuir a la correcta adquisición de conocimientos en los cursos de ingeniería. En el caso de la ingeniería estructural, estas prácticas adquieren una importancia especial, ya que permiten al estudiante desarrollar las habilidades necesarias para relacionar los conceptos fisicomatemáticos presentados en los cursos con situaciones reales <sup>1</sup>. Sin embargo, proporcionar a los ingenieros en formación los espacios adecuados para desarrollar prácticas experimentales no siempre es posible, debido a las limitaciones de espacio y presupuesto <sup>2,3</sup>. Por lo tanto, es necesario desarrollar alternativas que permitan suplir estas necesidades, como el uso de laboratorios virtuales.

Los laboratorios virtuales (LV) son herramientas basadas en el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) que facilitan la práctica experimental a través de medios digitales. Los LV buscan simular las condiciones de un laboratorio convencional (LC), permitiendo la práctica experimental sin las limitaciones anteriormente mencionadas. Estos laboratorios se pueden alojar en entornos digitales, como aplicaciones web, a las cuales los estudiantes pueden acceder mediante dispositivos electrónicos como computadores de escritorio, portátiles, tabletas o celulares.

En este proyecto se desarrollaron dos laboratorios virtuales: uno de un grado de libertad y otro de múltiples grados de libertad. El laboratorio de un grado de libertad representa la forma más básica de modelar una estructura dinámica, facilitando la comprensión de conceptos fundamentales como la frecuencia natural y la amortiguación. Por otro lado, el laboratorio de múltiples grados de libertad permite a los estudiantes explorar sistemas más complejos, donde varias partes de la estructura pueden moverse de manera independiente, ofreciendo una visión más completa de las interacciones y comportamientos de estructuras reales bajo cargas dinámicas.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los laboratorios virtuales, se comenzó con una revisión literaria que permitió establecer las bases conceptuales para cimentar los componentes esenciales de un laboratorio virtual. Se inició con la primera propuesta de laboratorio virtual, la disección virtual de la rana (Virtual Frog Dissection) desarrollada en 1997 por el Centro de Investigación Académica de la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, como material de apoyo para los cursos de biología <sup>4</sup>. Luego, se revisaron las simulaciones PhET (Physics Education Technology), desarrolladas por la

Organiza:

Universidad de Colorado, que proporcionaban entornos virtuales donde los estudiantes podían experimentar con fenómenos físicos y matemáticos <sup>5</sup>.

Además, se consideraron los criterios de evaluación y revisión crítica de laboratorios virtuales propuestos por Potkonjak <sup>6</sup>, que se resumen en cuatro criterios:

**Interactividad:** El grado en que los usuarios pueden interactuar con el laboratorio para realizar experimentos y observar resultados.

**Realismo:** La capacidad del laboratorio virtual para simular condiciones reales de manera precisa.

**Modelado:** La capacidad del laboratorio virtual para recrear entornos 3D.

**Relevancia educativa:** La alineación del laboratorio virtual con los objetivos de aprendizaje y su efectividad para enseñar conceptos clave, enfatizando la comunicación docente-estudiante.

Posteriormente, se analizaron las investigaciones realizadas por la Universidad del Valle, que construyeron módulos de laboratorios virtuales de dinámica en 2009 (ESIDE) <sup>7</sup> y un laboratorio de ingeniería sísmica en 2018 (SISMILAB) <sup>8</sup>. Este último permitía simular y evaluar el comportamiento del suelo y las estructuras sometidas a cargas estáticas y dinámicas. Finalmente, se estudió el desarrollo de un laboratorio virtual que permitía simular la respuesta mecánica del metal bajo diversas condiciones de carga y estados de tensión mediante algoritmos y modelos matemáticos precisos <sup>9</sup>.

A partir de esta revisión, se establecieron los siguientes componentes para el desarrollo de los laboratorios virtuales:

**Interfaz de usuario intuitiva:** Para facilitar la navegación y uso del laboratorio.

**Motor de simulación robusto:** Para asegurar la precisión y realismo en las simulaciones.

**Módulos educativos:** Para guiar a los estudiantes a través de los experimentos y conceptos teóricos.

**Acceso multiplataforma:** Para que los laboratorios sean accesibles desde diversos dispositivos electrónicos.

**Capacidad de evaluación y retroalimentación:** Para proporcionar a los estudiantes información sobre su desempeño y áreas de mejora.

Organiza:

## MODELO MÁTEMATICO

### Matriz de masa

La matriz de masa se calcula concentrando las masas de los pórticos en el centroide de cada piso y, posteriormente, calculando las fuerzas inerciales desde un eje ubicado en el centroide.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{A} J_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $m$  representa toda la masa del cuerpo,  $A$  el área y  $J_o$  el momento polar de inercia con respecto a su centroide.

### Matriz de Amortiguamiento

La matriz de amortiguamiento modal  $C$  se construye utilizando los valores de  $\zeta$  y las frecuencias naturales  $\omega$ . Para un sistema con  $n$  grados de libertad, la matriz es una diagonal, donde cada elemento diagonal  $c_{ii}$  se calcula como:

$$c_{ii} = 2\zeta_i \omega_i \quad (2)$$

### Matriz de rigidez

La matriz de rigidez se construye ignorando las deformaciones axiales de las vigas y columnas, y despreciando la rigidez a cortante y torsión. Por lo tanto, se consideran solo tres grados de libertad:  $u_x$  y  $u_y$ , que son desplazamientos horizontales, y  $u_z$  que es el giro alrededor del eje vertical.

Organiza:

## LABORATORIOS VIRTUALES

### Laboratorio de un grado de LIBERTAD (LSDOF)

El laboratorio de un grado de libertad se presenta como un entorno digital con una interfaz gráfica intuitiva y amigable. Su propósito es simular el comportamiento dinámico de un péndulo invertido bajo diversas excitaciones. Para registrar la respuesta del sistema, se utilizan acelerómetros y sensores de desplazamiento láser ubicados estratégicamente en la base y en la masa del péndulo. La resolución de la ecuación de movimiento se lleva a cabo mediante el método numérico de Newmark con aceleración promedio constante. Este enfoque proporciona las respuestas del sistema que se representan gráficamente, permitiendo una visualización clara del comportamiento dinámico de la estructura.

La estructura puede ser modelada utilizando el modelo MCK, donde M representa la masa, C la amortiguación, y K la rigidez. También se pueden definir los parámetros Zeta y  $\omega_n$ , que corresponden al coeficiente de amortiguamiento y a la frecuencia natural del sistema, respectivamente. Además, se pueden seleccionar materiales predefinidos para la estructura.

Al finalizar la simulación, los datos del montaje experimental estarán disponibles para su descarga. Estos datos permitirán realizar un análisis dinámico de la estructura, lo cual facilitará afianzar y relacionar gráficamente los conceptos explicados en clase con la respuesta real de la estructura.

El laboratorio está equipado con 7 menús funcionales: el menú de respuesta, el menú de propiedades dinámicas, el menú de configuración de sensores, el menú de excitaciones, el menú de acción, el menú de exportación y limpieza, y el menú de vistas (*Figura 1*).

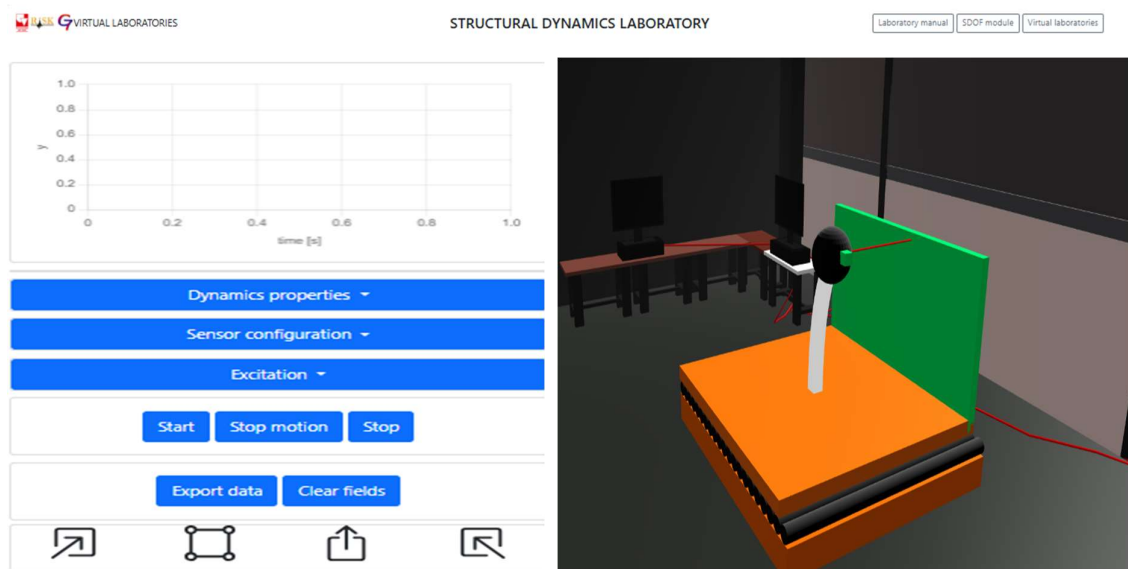
### Laboratorio de múltiples grados de libertad (LMDOF)

El laboratorio de múltiples grados de libertad está diseñado para permitir al usuario simular estructuras más complejas y cercanas a la realidad, utilizando modelos estructurales como pórticos de dos y tres pisos. Similar al laboratorio de un grado de libertad, el comportamiento dinámico se induce mediante excitaciones, y los sensores se distribuyen en la base y en los centros y laterales de cada losa. La ecuación de movimiento se resuelve utilizando el método numérico de Newmark con aceleración promedio constante para sistemas de múltiples grados de libertad, y al finalizar la simulación, los datos están disponibles para su descarga.

Organiza:

La principal diferencia con respecto al laboratorio de un grado de libertad radica en cómo se definen las propiedades dinámicas del sistema y las direcciones en las que se aplican las excitaciones. En este laboratorio, el usuario introduce parámetros más específicos de una estructura real, como el peso propio de las losas, su espesor, el módulo de elasticidad de las secciones junto con las dimensiones de la sección transversales.

Este laboratorio cuenta con 7 menús funcionales: el menú de sensores, el menú de propiedades dinámicas, el menú de excitaciones, el menú de direcciones, el menú de respuestas, el menú de cálculo, extracción y limpieza de datos, y finalmente, el menú de vistas (*Figura 2*).



*Figura 1. Interfaz gráfica: LMDOF*



Organiza:

**Laboratory parameters**

Sensor configuration ▾

Dynamics properties ▾

Excitation ▾

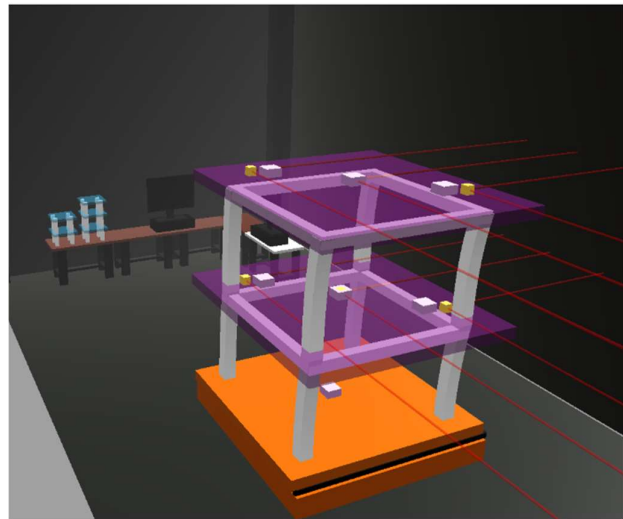
X-X ?    Y-Y ?    X-Y ?

**Response**

Calculate    Export data    Clear fields





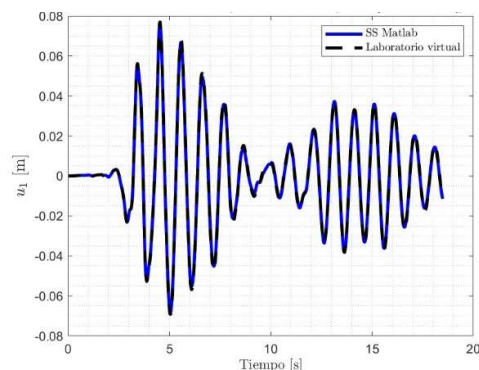



*Figura 2. Interfaz gráfica: LMDOF*

## VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación de resultados se llevó a cabo comparando los datos experimentales obtenidos del laboratorio virtual con aquellos generados mediante la función de espacios de estados de Matlab (SS Matlab) y un modelo analítico construido en SAP2000. En este documento se presentan algunos de los casos evaluados.

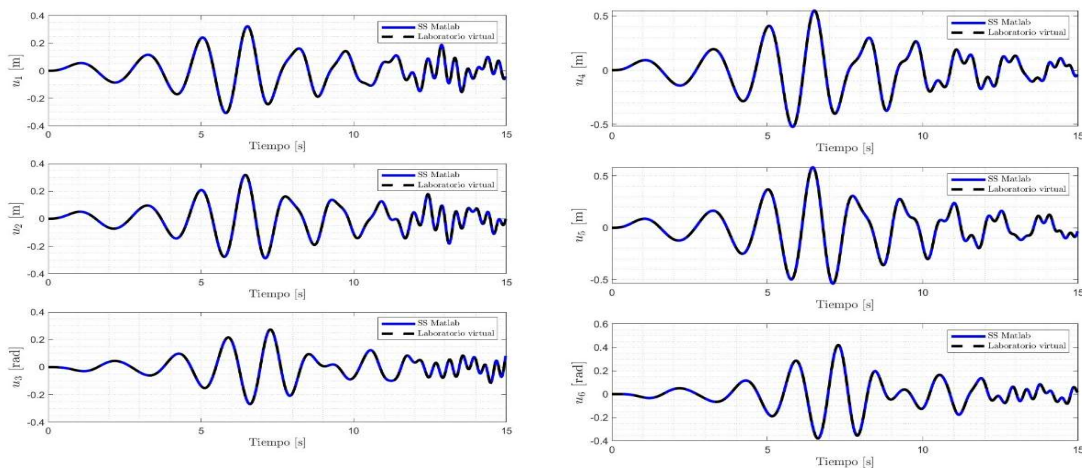
En la *Figura 3* se muestra la comparación entre la respuesta generada para el sismo de La Vega en el laboratorio virtual y la obtenida a partir de SS Matlab, para el LSDOF.



*Figura 3. Comparación de datos Lab. Virtual – SS Matlab : LSDOF*

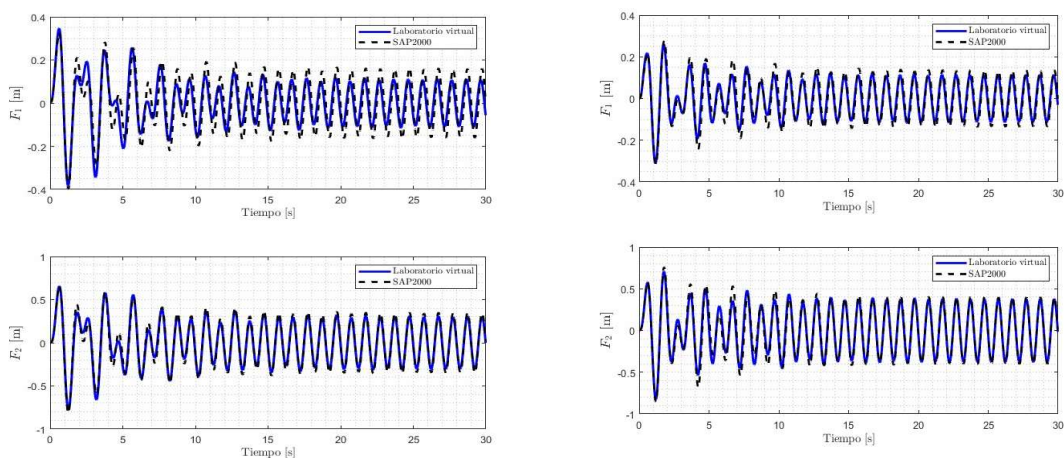
Organiza:

En la **Figura 4** se muestra la comparación entre la respuesta generada para un barrido de frecuencias en el laboratorio virtual y la obtenida a partir de SS Matlab, para el LMDOF.



**Figura 4. Comparación de datos Lab. Virtual – SS Matlab : LMDOF**

En la **Figura 5** se muestra la comparación entre la respuesta generada para un seno en el laboratorio virtual y la obtenida a partir de SAP2000 para el LMDOF. En las gráficas se muestran los desplazamientos horizontales de cada piso en las direcciones X e Y, respectivamente.



**Figura 5. Comparación de datos Lab. Virtual – SAP2000: LMDOF**

Organiza:

## IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN IMPACTO

La implementación y evaluación de los laboratorios virtuales se llevaron a cabo durante dos periodos académicos de la Universidad el Valle, 2023-2 y 2024-1. Durante estos periodos, se proporcionó acceso a la herramienta virtual a los estudiantes de los cursos de Fundamentos de Dinámica Estructural de pregrado (2023-1 y 2024-1) y del curso de Dinámica Estructural de posgrado (2023-1). Posteriormente, se realizó un seguimiento mediante talleres teórico-prácticos, que los estudiantes podían resolver utilizando los laboratorios virtuales.

La evaluación del impacto se llevó a cabo a través de una serie de encuestas. Estas encuestas evaluaban la percepción general de los estudiantes sobre la metodología utilizada para impartir los cursos, su habilidad para resolver problemas prácticos y su capacidad para relacionar los conceptos vistos en clase con estructuras reales. Las encuestas se aplicaron antes y después de implementar la herramienta virtual, permitiendo así medir la efectividad de los laboratorios en el proceso de aprendizaje (Figura 7).

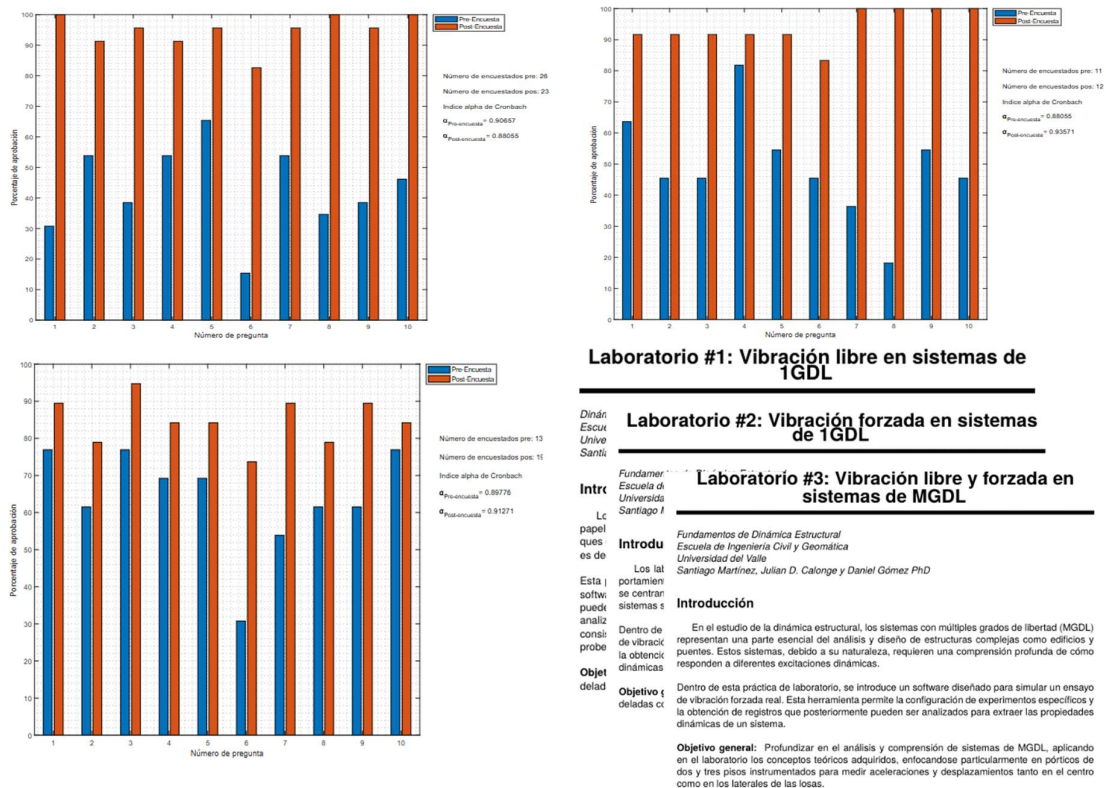


Figura 7. Evaluación de impacto

Organiza:

## CONCLUSIONES

Se desarrollaron dos laboratorios de dinámica estructural como herramienta de apoyo a la docencia y el aprendizaje. Estos laboratorios permiten la simulación del comportamiento dinámico de diversas estructuras de manera simultánea y a distancia. El uso de las TIC permitió reducir los costos asociados con el uso de un laboratorio convencional, ya que no se incurre en gastos para la adecuación de espacios, equipos y materiales necesarios para la realización de la práctica experimental. Con respecto a los datos arrojados por el laboratorio, se demostró mediante la validación de resultados que estos son confiables, garantizando su uso para diversas aplicaciones educativas dentro de los cursos de dinámica estructural.

Los resultados de las encuestas mostraron un recibimiento positivo de los laboratorios virtuales por parte de los estudiantes, demostrando así su utilidad como herramienta de apoyo para la docencia y el aprendizaje.

*Agradecimientos a la Universidad del Valle por brindar apoyo institucional y a CIDESCO por financiar este proyecto.*

*Agradecimientos al ingeniero Julián David Calonge por brindar apoyo durante la fase de implementación y evaluación de los laboratorios.*

Organiza:

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agudelo, J., y García, G. (2010). Aprendizaje significativo a partir de prácticas de laboratorio de precisión. *Latin-American Journal of Physics Education*, 4 (1), 22.
2. Magana, A., Ortega-Alvarez, J., Lovan, R., Gomez, D., Marulanda, J., y Dyke, S. (2017). Virtual, local and remote laboratories for conceptual understanding of dynamic systems. *International Journal of Engineering Education*, 33 (1).
3. Ortiz, A. R., Villamizar, S., Cruz, A., y Gomez, D. (2021). Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual en ingeniería estructural para el apoyo a la docencia y al aprendizaje.
4. Monge-Nájera, J., Rivas, M., y Méndez-Estrada, V. H. (2002). La evolución de los laboratorios virtuales durante una experiencia de cuatro años con estudiantes a distancia. En *Xi congreso internacional sobre tecnología y educación a distancia* (Vol. 5).
5. McKagan, S., Perkins, K. K., Dubson, M., Malley, C., Reid, S., LeMaster, R., y Wieman, C. (2008). Developing and researching phet simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76 (4), 406–417
6. Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., y Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309–327.
7. Valencia de Oro, A. L., Ramirez, J. M., Gomez, D., y Thomson, P. (2011). Aplicación interactiva para la educación en dinámica estructural. *Dyna*, 78 (165), 72–83.
8. Guerrero-Mosquera, L. F., Gomez, D., y Thomson, P. (2018). Development of a virtual earthquake engineering lab and its impact on education. *Dyna*, 85 (204), 9–17.
9. Liu, W., Li, X., Liu, M., Cui, H., Huang, J., Pang, Y., y Ma, J. (2024). Virtual laboratory enabled constitutive modelling of dual phase steels. *International Journal of Plasticity*, 175, 103930. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641924000573> doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.10393>.

Organiza: