

Diseño de entornos virtuales de aprendizaje para estudiantes de ingeniería en tiempos de COVID-19: Elaboración de laboratorios virtuales de Transferencia de Calor

Designing Virtual Learning Environments for engineering students during COVID-19 pandemic: Development of virtual labs for Heat Transfer

José E. Cuevas Pérez-Gómez^a, Sergio D. Schiavone-Valdéz^{a,b}, Walter M. Warren-Vega^a, Marco A. Zárate-Navarro^b, Armando Campos-Rodríguez^b, Luis A. Romero-Cano^{a,*}

^a Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Calle Centenario del Instituto Juárez S/N Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. <https://orcid.org/0000-0002-4943-1202>

^b Departamento de petrolera, energía y ciencias básicas, Universidad Autónoma de Guadalajara, Campus Tabasco. Prol. Paseo Usumacinta km 3.5, Fracc. El Country, C.P. 86039, Villahermosa, Tabasco, México.

* autor por correspondencia

RESUMEN

El 20 de marzo del 2020 la enseñanza presencial en Jalisco, México, fue suspendida debido a la pandemia ocasionada por la propagación de SARS-CoV-2. Esto inmediatamente puso en peligro la conclusión de cursos escolares. La presente comunicación muestra estrategias efectivas de enseñanza implementadas para abordar temas de transferencia de calor a nivel licenciatura para las carreras de ingeniería de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) durante las restricciones escolares. La investigación se centró en diseñar prácticas virtuales para comprender fenómenos de transferencia de calor empleando el software de acceso libre Energy2D, así como su implementación dentro de un nuevo entorno virtual de aprendizaje. Para definir las actividades de las prácticas primeramente se definieron los objetivos de aprendizaje y se estudiaron de acuerdo con la taxonomía 2D de Anderson & Krathwohl. Las prácticas se diseñaron para comprender los fenómenos de conducción, convección y radiación de calor. La estrategia didáctica se evaluó en la asignatura de Fenómenos de Transporte en los periodos 2020-02, 2021-02 y 2021-03 para alumnos de ingeniería química, biotecnología y alimentos. Mediante su aplicación fue posible concluir satisfactoriamente los cursos durante las restricciones escolares, además permitió introducir a los alumnos a conceptos básicos de simulación de procesos asistidos por computadora.

Palabras clave: Educación en Ingeniería, Restricciones escolares COVID-19, Transferencia de Calor, Entornos virtuales de Aprendizaje, Energy2D.

ABSTRACT

Since March 20, 2020, face-to-face learning in Jalisco, Mexico, was suspended due to the pandemic caused by the spread of SARS-CoV-2. The above immediately jeopardized the completion of school courses. In the following research work, effective learning strategies are presented to address various heat transfer topics for undergraduate students common in some engineering programs in the Universidad Autónoma de Guadalajara during lockdown restrictions. The goal of this contribution is to design virtual practices to understand heat transfer phenomena using a free access software named Energy2D, and its implementation within a new virtual learning environment. First, to define activities for the practices, learning objectives were defined based on Anderson and Krathwohl's Two-Dimensional taxonomy. Subsequently, the virtual practices were designed to comprehend conduction, convection, and heat radiation phenomena. The didactic strategy was evaluated in groups of Transport Phenomena in the academic terms of 2020-02, 2021-02, and 2021-03 for students of chemical, biotechnology, and food engineering. The application allowed the successful completion of the course during scholar restrictions; also, it provided the introduction to understand basic concepts to students in the use simulation of computer-assisted processes.

Keywords: Engineer education, COVID-19 scholar restrictions, Heat Transfer, Virtual Learning Environments, Energy2D

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

1. Introducción

1.1 Marco teórico

La pandemia provocada por la propagación del SARS-CoV-2 ha impactado al sector de la educación superior a nivel mundial (Araújo et al., 2020; Vlachos et al., 2021). La propagación del virus obligó a los países a implementar un cierre internacional en las escuelas la cual afectó a más de 862 millones de niños y jóvenes (Viner et al., 2020). Como estrategia para enfrentar este problema, muchas universidades se enfocaron inicialmente en la transición del contenido presencial al aprendizaje en línea a partir de la realización de conferencias en línea a los estudiantes afectados por las restricciones de confinamiento, dejando de lado la pedagogía (Assunção Flores & Gago, 2020). Este mismo escenario se planteó en México durante el primer trimestre de 2020. Estos cambios impactaron profundamente en la dinámica universitaria y presentaron un desafío para los estudiantes, docentes, sus familias y el sistema universitario en general (Zapata-Garibay et al., 2021). Ante este escenario, las universidades han centrado sus esfuerzos en modificar sus aprendizajes. estrategias para adaptarse al aprendizaje remoto (Bawa, 2020). Un caso particular ocurre con los estudiantes de ingeniería, en los que los profesores necesitan transmitir temas complejos para comprender los conceptos básicos de varios fenómenos físicos (García-Alberti et al., 2021; Lapitan Jr. et al., 2021; Ożadowicz, 2020). Para lograr esto, es necesario utilizar diagramas y resolver problemas utilizando métodos convencionales, lo que dificulta el aprendizaje de los estudiantes, siendo obligatorio el uso de laboratorios prácticos para reforzar sus conocimientos. Bajo esta consideración, es necesario plantear nuevas propuestas didácticas durante el período de confinamiento.

Dado que se implementaron restricciones de asistencia a los laboratorios presenciales, los simuladores informáticos son una alternativa adecuada (Davidovitch et al., 2006; Fang, 2012; Koh et al., 2010). Esta estrategia ha cobrado mayor importancia ya que permite a los estudiantes visualizar fenómenos físicos siendo más evidente cómo se está llevando a cabo un proceso o mecanismo, lo que conduce a un mejor dominio del tema (Johnson-Glauch et al., 2020). Lo anterior se basa en la filosofía de Gardner (Davis et al., 2011), que establece la necesidad de fortalecer las ocho inteligencias identificadas que tiene el ser humano para su correcto desarrollo: i) Lógico-matemática, ii) Lingüística, iii) Espacial, iv) Musical, v) Corporal-cinestésico, vi) Intrapersonal, vii) Interpersonal, y viii) Naturalista. Varios estudios han demostrado que los estudiantes tienen diferentes estilos de aprendizaje, siendo el visual el más predominante (Arneson & Offerdahl, 2018;

Prince & Felder, 2006). Se han realizado varias pruebas para evaluar el proceso de transferencia de conocimiento en el uso de simuladores informáticos y su impacto en diferentes situaciones mostrando resultados positivos, además de tener la ventaja de ser accesibles a docentes y estudiantes (Bossard et al., 2008; Chou & Liu, 2005; Fu, 2003). Así, estudios como el propuesto por Gillet et al., (2001) han incorporado algunos simuladores para entornos de acceso remoto que ayudaban al aprendizaje virtual, dando resultados satisfactorios. Del mismo modo, otros grupos de investigación, como Davidovitch et al., (2006); Fraser et al., (2007), demostraron la viabilidad de su uso para cursos significativamente diferentes, como gestión de proyectos y mecánica de fluidos, respectivamente.

De esta forma, el uso de herramientas computacionales de libre acceso puede permitir a los estudiantes de ingeniería representar de forma didáctica diversos escenarios de la industria o de la investigación científica. Estas herramientas pueden ayudarlos a comprender los fenómenos que se pueden encontrar en sus futuros trabajos. Estudios recientes han demostrado la eficacia de estas herramientas al demostrar que su uso permite a los estudiantes proponer una resolución a los problemas difíciles de analizar por los métodos tradicionales de enseñanza, que se limitan a resolver problemas matemáticos a mano (Alanís Navarro et al., 2019; Malgieri & Onorato, 2020; Rodríguez & Niño, 2016; Sutjahja et al., 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, se propone una estrategia en la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) para promover el aprendizaje durante las restricciones de confinamiento, incorporando las tecnologías de la información y la comunicación en sus carreras de ingeniería al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología. Departamento de diseño). Por lo anterior, se planteó el diseño de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) con el propósito de facilitar la diversificación de las modalidades de enseñanza y acompañar el trabajo de los docentes y estudiantes de la UAG, poniendo a disposición un conjunto de herramientas y entornos de aprendizaje. Un VLE se puede definir como un sitio web con acceso remoto a herramientas para apoyar actividades educativas presenciales o como la estrategia principal en la organización e implementación de cursos en línea (Horton, 2000). Un entorno informático apoya las actividades docentes utilizando tecnologías de la información que darán herramientas para dos objetivos principales: a) transmisión de contenidos de aprendizaje, b) apoyo a la comunicación (Kozaris, 2010). En este proyecto de investigación se llevó a cabo el desarrollo de un entorno virtual de aprendizaje de Fenómenos de Transferencia y Transporte de Calor para estudiantes de Biotecnología, Alimentos e Ingeniería Química. Para lograrlo, se puede fusionar la incorporación de la suite institucional Microsoft Office 365, Moodle y sitio web con acceso remoto a entornos virtuales para reemplazar las experiencias presenciales por herramientas en línea. Este sitio, denominado Laboratorio Virtual, tiene integrado un software de libre acceso Energy2D. Este software es un programa de simulación multifísica interactivo que puede modelar los tres mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) y su acoplamiento con la dinámica de fluidos (Xie, 2012). Esta elección se basa en la flexibilidad de la aplicación que permite diseñar experimentos virtuales para probar hipótesis cualitativas simples o resolver problemas de ingeniería sin recurrir a matemáticas complejas. Una vez implementado el EVA, se aplicó la estrategia pedagógica con varias cohortes de estudiantes de ingeniería durante 2020 y 2021.

1.2 Hipótesis

La implementación de entornos virtuales de aprendizaje en asignaturas con laboratorio pertenecientes al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG permitirán mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2.

1.3 Objetivo

Cumplir con las sugerencias emitidas por la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) en 2020 para mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2. Así como garantizar la continuidad de las actividades académicas manteniendo los estándares de calidad de la UAG.

2. Material y método

2.1 Definición de objetivos de aprendizaje en prácticas virtuales según la taxonomía de Anderson & Krathwohl (A&K) 2D

Las actividades en cada una de las prácticas virtuales se determinaron a partir de la definición de los objetivos didácticos. De esta forma, fue posible asegurar la estimulación y aplicación de procesos de pensamiento secuencial para garantizar la adquisición, operacionalización de conocimientos y habilidades, reflejo de competencias interiorizadas a partir de acciones estratégicas propuestas durante la planificación de las prácticas virtuales.

Los objetivos de aprendizaje se definieron de la siguiente manera:

Objetivo 1: Comprender los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación).

Objetivo 2: Diseño del montaje mediante la selección de los accesorios adecuados para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor.

Objetivo 3: Aplicar los conceptos básicos de transferencia de calor para resolver problemas de ingeniería.

Objetivo 4: Demostrar los fenómenos de transferencia de calor a través de experimentos diseñados mediante simulación asistida por computadora.

La dimensión del proceso cognitivo consiste en:

1. Recordar: Recuperar conocimientos relevantes de la memoria a largo plazo.
2. Comprender: Construir significado a partir de mensajes instructivos que incluyan comunicación oral, escrita y gráfica.
3. Aplicar: Realizar o utilizar un procedimiento en una situación dada.
4. Analizar: Dividir el material en sus partes constituyentes y determinar cómo se relacionan los aspectos entre sí y con una estructura o propósito general.
5. Evaluar: Emitir juicios basados en criterios y normas.
6. Crear: Juntar elementos para formar un todo coherente o funcional.

Mientras que la dimensión del conocimiento está conformada por:

1. Hechos: Elementos esenciales que los estudiantes deben conocer para familiarizarse con una disciplina o resolver problemas en ella.
2. Conceptos: Interrelaciones entre los elementos cruciales dentro de una estructura más amplia que les permite funcionar juntos.
3. Procedimientos: métodos y criterios de investigación para el uso de habilidades, algoritmos, técnicas y estrategias.
4. Metacognitivo: Conocimiento de la cognición en general, así como conciencia y conocimiento de una cognición.

Tabla 1. Clasificación de los objetivos basada en la taxonomía bidimensional de Anderson y Krathwohl

Prácticas Virtuales de Transferencia de Calor

Taxonomía de Anderson y Krathwohl

Dimensión del Conocimiento	Dimensión del Proceso Cognitivo					
	Recordar	Comprender	Aplicar	Analizar	Evaluar	Crear
Fáctico			Obj 3.			
Conceptual	Obj 1.					Obj 2.
Procedimental		Obj 2.		Obj 4.		
Metacognitivo					Obj 4.	

2.2 Diseño de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) para estudiantes de ingeniería

El establecimiento del EVA consistió en incorporar las herramientas del Campus Digital de la UAG (Microsoft Office & Moodle) y el software informático Energy2D. El acceso al EVA para los estudiantes se ha realizado ingresando a su cuenta institucional. Una vez que los estudiantes inician sesión en la suite de Microsoft, tienen acceso a las plataformas digitales de Microsoft Teams, una aplicación para realizar sesiones en línea, y Microsoft Stream, para reproducir las sesiones grabadas en cualquier momento si lo necesitan. La unificación de estos programas ha apoyado el establecimiento de aulas virtuales donde se habilitará un espacio para sesiones sincrónicas (transmisión en vivo del disertante) y asincrónicas (trabajo independiente basado en diseño instruccional). Moodle permite el almacenamiento en la nube, en el que hay un intercambio de conferencias, problemas, tareas y pruebas entre los estudiantes y el profesor. Finalmente, la integración del software Energy2D permitió al alumno disponer de un espacio utilizado como Laboratorio Virtual para replicar experimentos de laboratorio.

2.3 Diseño de prácticas virtuales de Transferencia de Calor

Para cumplir con el programa académico y estar dentro de lineamientos de enseñanza de alta calidad, el EVA cuenta con un espacio de Laboratorio Virtual a través del software de libre distribución Energy2D, un simulador bajo licencia MIT no extensible a creaciones propias. Las prácticas virtuales implementadas en el EVA consistieron en pruebas que permiten comprender los fenómenos de conducción, convección y radiación. En la primera práctica, el objetivo era introducir al alumno en el uso de un programa de simulación para modelar fenómenos de transferencia de calor en la cual se comienza mostrando el uso de la interfaz del software. Posteriormente, se diseña un experimento junto con el estudiante para describir la transferencia de calor por conducción en una barra entre dos bloques a diferentes temperaturas. Para resolver el problema, el estudiante debe crear un bloque rectangular con dimensiones definidas, proporcionar las propiedades térmicas del material, colocar sensores de temperatura (T), sensores de flujo de calor ($q = Q/A$, donde Q es el flujo de calor y A es el área), y definir las condiciones operativas del proceso. Finalmente, cuando se ejecuta la simulación, los sensores virtuales adquieren datos para graficar T vs. la posición necesaria para resolver el ejercicio con la Ley de Fourier.

En la segunda práctica, se le pide al estudiante que diseñe un experimento para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección de una fuente de calor a su entorno. Como en la práctica anterior, la solución del ejercicio es bocetar objetos en el entorno virtual e introducir las propiedades físicas de los objetos virtuales. La simulación permite obtener gráficos de t vs. T vs. q and T_{sup} vs. q . Usando la Ley de enfriamiento de Newton, es posible resolver la tarea.

Finalmente, la tercera práctica consistió en diseñar un experimento de determinación de la constante de Stefan-Boltzmann. En este caso se incluyen los conceptos de radiación, cuerpo negro y

emisividad.

2.4 Implementación del EVA en estudiantes de ingeniería

La implementación del EVA y las prácticas virtuales diseñadas se realizaron en la asignatura de Fenómenos de Transporte en grupos combinados de Ingeniería en Alimentos, Ingeniería Química e Ingeniería en Biotecnología. Los periodos evaluados fueron 2020-02 ($n = 42$), 2021-02 ($n = 26$), 2021-03 ($n = 14$). Luego de la aplicación en cada término, se realizó el análisis y discusión de los resultados. Finalmente, las calificaciones finales de los periodos mencionados se contrastaron contra los correspondientes al 2018-02 ($n = 17$) y 2019-02 ($n = 13$), a fin de corroborar la hipótesis del trabajo.

3. Resultados y discusión

3.1 Diseño e implementación de un entorno virtual para estudiantes de transferencia de calor en ingeniería.

La configuración del Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) consistió en integrar la suite Microsoft Office 365, Moodle y el software interactivo de libre acceso Energy2D dentro del Campus Digital de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), Figura 1. Mediante el uso de la cuenta institucional, se es posible acceder a las herramientas VLE. El video complementario 1 (ver Tabla 2) muestra el VLE integrado y señala cada una de las herramientas que se han integrado.

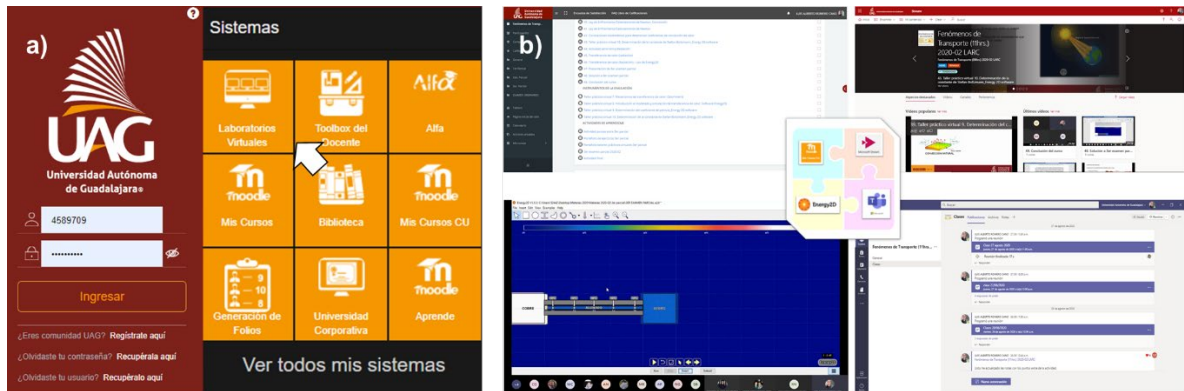


Figura 1. Implementación del Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) mediante la integración de: (a) Campus Digital de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) con (b) la suite Microsoft Office 365, Moodle y el software de libre acceso Energy2D.

Tabla 2. Enlaces de acceso para descargar videos complementarios: Integración de EVA y prácticas virtuales de transferencia de calor (capacitación del uso del EVA y software Energy2D).

VIDEOS	DOWNLOAD LINK
Video 1. Implementación de EVA a través de la integración de las herramientas de Microsoft Office 365, Moodle y el software Energy2D	https://www.youtube.com/watch?v=IIUNpm2U3n0
Video 2. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por conducción	https://www.youtube.com/watch?v=B2z-UDa1Q48
Video 3. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por convección	https://www.youtube.com/watch?v=4w1XdGeq8XQ
Video 4. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por radiación	https://www.youtube.com/watch?v=KngD7N47ltM

3.2 Diseño e implementación de talleres prácticos virtuales dentro del EVA

La asignatura de Fenómenos de Transporte tiene programadas sesiones de dos horas de laboratorio a la semana. Debido a las restricciones de confinamiento para reducir la propagación del COVID-19, estos debieron reestructurarse para realizarse de forma remota. A continuación, se presentan tres de las actividades diseñadas para realizar prácticas virtuales utilizando el software Energy2D integrado en el VLE. Es importante señalar que todas las dimensiones de la práctica virtual corresponden a largo por alto (L, cm x h, cm) con un área transversal constante.

3.2.1 Taller práctico virtual 1: Conducción del calor

Conceptos básicos

La transferencia de calor por conducción se logra a través de dos mecanismos: el primer mecanismo es una interacción molecular, en la que las moléculas en niveles de energía relativamente más altos (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles más bajos. Este tipo de transferencia ocurre en sistemas que tienen moléculas sólidas, líquidas o gaseosas y en los que existe un gradiente de temperatura (Welty et al., 1999). El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es por electrones libres, principalmente en sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales (Welty et al., 1999). La capacidad de los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; en consecuencia, se espera que los metales puros sean mejores conductores del calor, hecho confirmado por la experiencia y demostrado en esta práctica virtual.

Experimental

El experimento de conducción de calor consistió en medir la evolución temporal de la temperatura en una barra de aluminio (6 cm x 0.5 cm) cuyos extremos están en contacto térmico con dos cuerpos de calor a diferente temperatura. Los cuerpos de baja temperatura consistieron en un bloque de acero (2 cm x 4 cm) a temperatura ambiente (18 °C). Por otro lado, el cuerpo de alta temperatura consistió en un bloque de cobre (2 cm x 4 cm) calentado por una fuente externa que permite mantener una temperatura de 350 °C. Además, se colocan cinco sensores de temperatura en la barra de aluminio a distancias iguales. La barra está aislada del entorno del laboratorio utilizando fibra de vidrio para reducir la pérdida de calor por radiación y convección de aire. Inicialmente, la barra de aluminio está a una temperatura ambiente uniforme.

Usando el software Energy2D, se le pide al estudiante que obtenga lo siguiente:

1. El diagrama que representa el montaje experimental.
2. La simulación del proceso hasta alcanzar el estado estacionario.
3. Un gráfico que muestra los valores numéricos del sensor (temperatura) en diferentes posiciones de la barra como una función de tiempo hasta alcanzar el estado estacionario.
4. Un gráfico que muestra la posición del sensor frente a la temperatura registrada en 4 intervalos de tiempo diferentes hasta alcanzar el estado estable.
5. Describe y comenta cada una de las parcelas.

Discusión

La primera actividad fue realizada sincrónicamente por el profesor (Figura 2a), en la que se resuelve el ejercicio de forma tradicional utilizando lápiz y papel. Con los conceptos básicos de aplicación de la Ley de Fourier (Joseph Fourier & Freeman, 1878) fue posible comprender y comprender el ejercicio. Mediante esta interpretación, el alumno no ha observado el fenómeno de la conducción de calor, y solo obtiene una solución numérica para el estado estacionario. Por otro lado, al realizar la simulación del software, la interacción del alumno con un entorno didáctico le permite comprender

el fenómeno físico. Mediante bloques y cuadros de texto, el alumno puede reproducir los bocetos dibujados en la pizarra de Microsoft Teams. La configuración de bloques se ha realizado introduciendo la temperatura y las propiedades físicas de los materiales, que pueden consultarse en los apéndices de los libros de texto de transferencia de calor (Werty et al., 1999) (Figura 2b). Una vez completada la configuración, es posible iniciar la simulación (Figura 2c). Dentro del software, al utilizar una paleta de colores, es posible observar la transferencia de calor de un cuerpo caliente a uno frío; también es posible apreciar un equilibrio térmico ya que todos los cuerpos involucrados alcanzan la misma temperatura, representada en blanco (ver video 2 – Tabla 2). Es importante señalar que el software reduce o acelera el tiempo de simulación para observar el fenómeno en detalle. Los datos registrados por los sensores de temperatura se pueden exportar a una hoja de cálculo de Microsoft Excel, y se puede realizar un tratamiento numérico para obtener la solución al problema (Figura 3d). A través de esta representación, es posible observar un perfil de temperatura lineal que confirma que el gradiente de temperatura es proporcional a la posición de los sensores, como lo indica la Ley de Fourier (Banderas, 1988) para la transferencia de calor por conducción, ecuación 1.

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde \dot{Q}_x es el calor transferido en la dirección x de una superficie caliente a una fría; k es la conductividad térmica del material; A es el área de la sección transversal; DT es la diferencia entre la temperatura de un cuerpo caliente y un cuerpo frío, y Dx es la separación entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío.

El taller se puede reproducir utilizando diferentes materiales en la placa que une los depósitos. El alumno puede proponer materiales aislantes y buenos conductores térmicos y comprender visualmente el fenómeno, fomentando el pensamiento crítico.

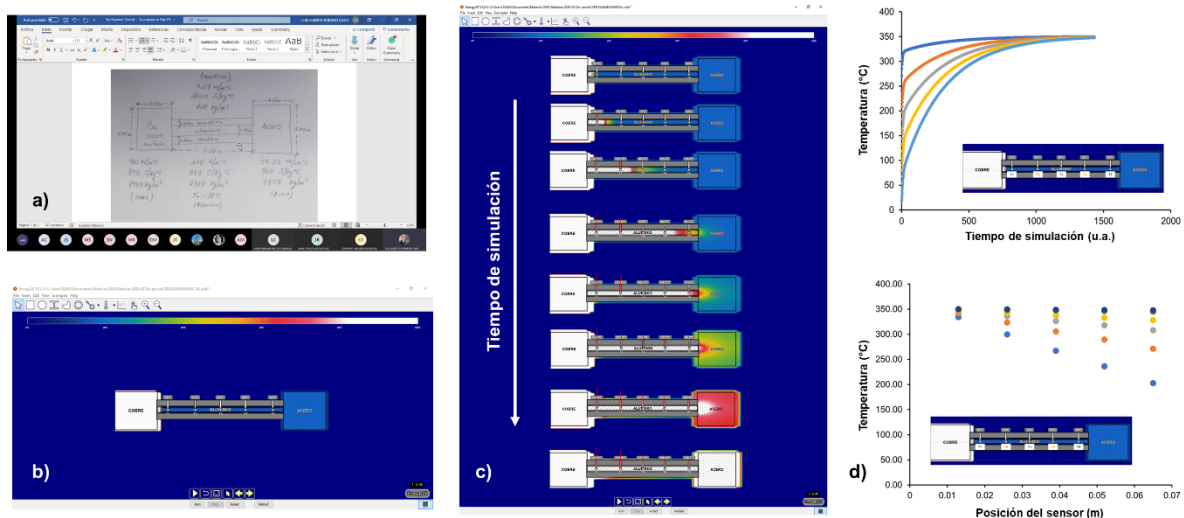


Figura 2. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por conducción: a) Captura de pantalla de la sesión síncrona, b) Captura de pantalla de la construcción de la práctica dentro del software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de conducción de calor, d) Representación matemática obtenido a partir del fenómeno de conducción de calor.

3.2.2 Segundo Taller Práctica Virtual: Transferencia de calor por convección natural

Conceptos básicos

La convección natural es un mecanismo de transporte de calor en el que el movimiento del fluido no es generado por una fuente externa. En cambio, el movimiento del fluido es causado por la flotabilidad, la diferencia en la densidad del fluido se produce debido a los gradientes de temperatura.

Recientemente, la convección natural ha atraído la atención de muchos investigadores debido a sus amplias aplicaciones tanto en la naturaleza como en la tecnología de la ingeniería (Zheng & Zhang, 2017).

Experimental

El experimento de convección de calor natural consistió en determinar el coeficiente de convección en el proceso de enfriamiento natural de una barra. El fluido (propiedades: conductividad = 0.025 W/m°C; calor específico = 1012 J/kg°C; densidad = 1,20 kg/m³; viscosidad cinemática = 0.00001568 m²/s) se programa inicialmente a 18 °C y entra en contacto con una placa de un material "x" (propiedades: conductividad = 1 W/m°C; calor específico = 1000 J/kg°C; densidad = 25 kg/m³; dimensiones = 3.2 m x 0.4 m) que se encuentra inicialmente a 100° C. Nota: Defina un área de estudio de 3.2 m x 4 m. Los aislantes térmicos se recomiendan para eso (Propiedades: conductividad térmica = 0 W/m°C; calor específico = 1000 J/kg°C; densidad = 25 kg/m³).

Usando el software Energy2D, se le pidió al estudiante que obtuviera lo siguiente:

1. El diagrama que representa el montaje experimental.
2. La simulación del proceso hasta alcanzar el equilibrio térmico.
3. Hacer las parcelas:
 - Temperatura superficial y flujo de calor en función del tiempo.
 - Temperatura superficial frente a flujo de calor.
4. El coeficiente de película utilizando las gráficas anteriores.

Discusión

De manera similar al taller anterior, a través de una actividad síncrona, se definieron los diagramas de ejercicios (Figura 3a), y después se reprodujeron exitosamente en el software Energy2D mediante bloques (Figura 3b). Al iniciar la simulación (Figura 3c), fue posible apreciar el enfriamiento de la barra utilizando la paleta de colores (ver video 3 –Tabla 2). El fenómeno anterior se representó gráficamente (Figura 3d, arriba) exportando los datos obtenidos durante la simulación, mostrando una tendencia exponencial de la temperatura del fluido hasta alcanzar un perfil estacionario. Estos mismos datos se organizaron en una segunda gráfica (Figura 3d, abajo) para representar la ecuación 2 de la Ley de Enfriamiento de Newton (Davidzon, 2012), y de ella obtener el coeficiente convectivo (0.017 W/m² °C).

$$\dot{Q} = hA\Delta T \quad (2)$$

Donde \dot{Q} corresponde al calor transferido desde la superficie de un sólido a un fluido en movimiento; h es el coeficiente convectivo de la superficie del fluido; y ΔT es la diferencia entre la temperatura de la superficie (T_s) y la temperatura del fluido (T).

Es fundamental destacar que la solución de este taller se ha llevado a cabo eliminando los efectos de bucles convectivos durante la simulación (caja convectiva en las propiedades). Durante la ejecución del taller, se recomendó a los alumnos la realización del ejercicio considerando ambos casos. Con esta estrategia fue posible discutir el efecto del cambio de densidad en el fluido debido al cambio de temperatura, que provoca su movimiento.

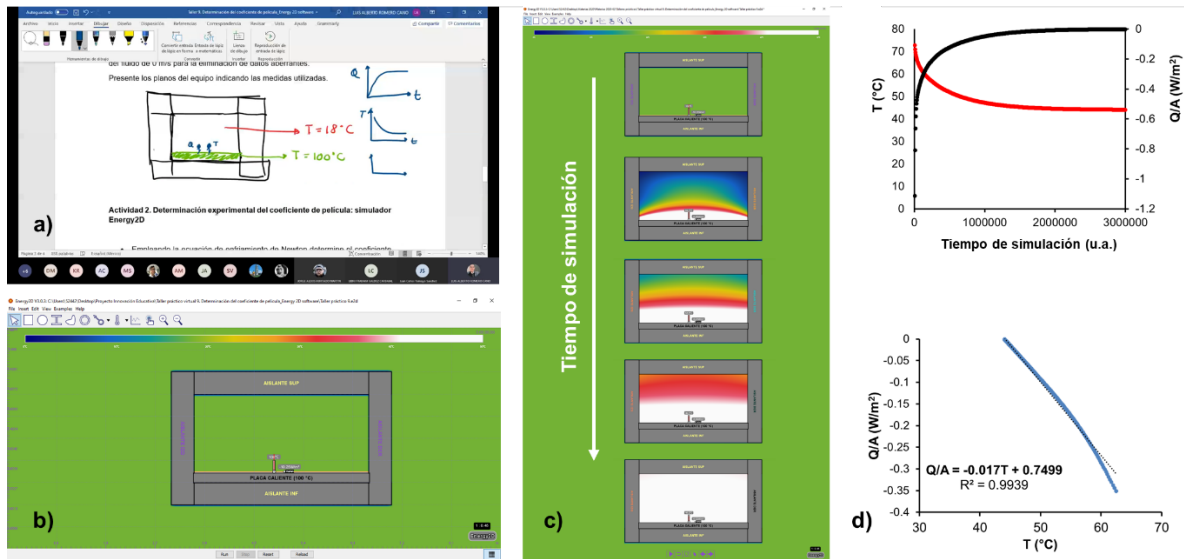


Figura 3. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por convección: a) Captura de pantalla de sesión síncrona, b) Captura de pantalla de la construcción de la práctica dentro del software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de convección de calor, d) Representación matemática obtenido a partir del fenómeno de convección de calor.

3.2.3 Tercer Taller de Práctica Virtual: Estimación de constantes de Stefan-Boltzmann por radiación térmica

Conceptos básicos

El conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por un cuerpo, a una temperatura superior al cero absoluto, se conoce como radiación térmica. A temperaturas inferiores a 600 °C, la radiación térmica emitida por un cuerpo negro (un emisor/receptor perfecto definido en los párrafos siguientes) no es visible ya que la energía radiada tiene una distribución espectral centrada en la región infrarroja del espectro electromagnético. A medida que el cuerpo se calienta, la distribución anterior cambia a longitudes de onda más cortas. Entre 600 y 700 °C, se emite suficiente energía dentro del espectro visible para que el cuerpo brille de color rojo oscuro. A temperaturas aún más altas, el cuerpo se vuelve rojo brillante e incluso "blanco-rojo", como el filamento de una bombilla (Simone Fohrmann et al., 2015).

Podemos resumir la teoría de la radiación en tres leyes principales: i) La ley de Wien, que establece que el poder emisor espectral depende de la longitud de onda pero se desplaza a diferentes temperaturas, ii) La distribución de Planck, que define la distribución de intensidad espectral de un negro cuerpo y considera la naturaleza discreta de la energía (cuanta), y iii) La ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 3), que establece que el poder emisor es proporcional a T^4 , siendo T la temperatura absoluta, que se deriva de la integración de la distribución de Planck a lo largo de todas las longitudes de onda, lo que resulta en la naturaleza continua de la emisión de cuerpo negro (Kirchhoff, 1860).

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3)$$

Donde $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann (una constante fundamental), T es la temperatura absoluta, A es el área en unidades propias y ε es la emisividad del cuerpo. La emisividad es una medida a la cual un cuerpo puede absorber radiación térmica, y se puede definir de acuerdo con la Ecuación 4:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{ideal}} \in (0,1) \quad (4)$$

Donde \dot{Q}_{ideal} es el calor absorbido por un cuerpo negro; un objeto ideal capaz de absorber toda la radiación térmica y transformarla en energía interna. Esta definición no está relacionada con el color del objeto. Cuanto más cerca está la emisividad de la unidad, más energía térmica irradia/absorbe, y cuanto más cerca está de cero (una característica de los materiales brillantes), menos energía irradia/absorbe. Cuando dos objetos interactúan entre sí, la tasa neta de transferencia de calor viene dada por la Ecuación 5:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_{surr}^4 - T_{obj}^4) \quad (5)$$

Siendo T_{obj} la temperatura absoluta del cuerpo receptor de la radiación del entorno a una temperatura T_{surr} , denominado “cuerpo emisor”. Es importante destacar que cuando las ondas electromagnéticas inciden en la superficie de un cuerpo, parte de esa energía electromagnética se transforma en energía interna en función de su capacidad de absorción de radiación térmica. Se absorbe una fracción de radiación, α , parte se refleja con fracción ρ , y parte se transmite con fracción τ , tal que $\alpha + \rho + \tau = 1$ (propiedades ópticas adimensionales).

Experimental

El experimento de radiación de calor consistió en determinar el valor de la constante de Stefan-Boltzmann a partir de la construcción de un experimento que involucra un cuerpo emisor y un cuerpo receptor. Los siguientes supuestos se consideraron para simplificar el experimento y deben recordarse en los párrafos siguientes (Bergman et al., 2020; Flynn et al., 2019):

- Los objetos bajo estudio son opacos, tales que $\tau \approx 0$, entonces $\alpha + \rho = 1$.
- Las dimensiones relativas de los cuerpos son tales que un cuerpo puede tratarse como un entorno con un cuerpo mucho más pequeño en el interior. El cuerpo pequeño tiene poco efecto sobre el campo general y $\alpha = \varepsilon$.
- La radiación térmica que recibe un objeto depende de su orientación, geometría y la distancia que lo separa de las fuentes de radiación. Con el supuesto anterior no es necesario introducir una corrección del factor de visualización.
- Las propiedades ópticas no son una función de la longitud de onda.

Para el experimento de transferencia de calor, se consideraron dos objetos que interactúan: un objeto lo suficientemente grande como para actuar como un cuerpo circundante o emisor a temperatura constante, y un objeto pequeño o cuerpo receptor, ambos encerrados por un límite con propiedades reflectantes. Se consideraron las siguientes propiedades físicas de los objetos que interactúan:

- Propiedades del recinto: absorptividad = 0.5, reflectividad = 0.5 y emisividad = 1. Este recinto consta de dos paredes verticales de 0.1 m de ancho por 0.75 de alto y dos paredes horizontales de 1.22 m de ancho por 0.10 m de alto que actúan como una caja para reflejar la Radiación termal.
- Propiedades del cuerpo emisor: absorptividad = 0, reflectividad = 1 y emisividad = 1. Dimensiones: 1.15 m de ancho por 0.1 m de alto.
- Propiedades del cuerpo receptor: absorptividad = 0,85, reflectividad = 0.15 y emisividad = 0.85, ancho = 0.06 m y altura = 0.01 m. Conductividad térmica = 350 W/(m °C), calor específico = 400 W/(kg °C) y densidad = 8960 kg/m³.

Además, se consideró lo siguiente: i) Las propiedades convectivas del fondo se desactivaron, y ii) El objeto más pequeño estuvo centrado con el objeto más grande y se mantuvo al menos a 0.30 m de él para que el factor de visualización fuera más cercano a la unidad.

De manera similar a los experimentos virtuales anteriores, los estudiantes completaron las siguientes tareas:

1. Dibujaron un boceto representativo del experimento y colocaron los sensores de temperatura en cualquier lugar dentro de los objetos.
2. Midieron el flujo y la temperatura en estado estacionario en el objeto pequeño, obtenidos después de aprox. 105 minutos en el simulador (Nota: se puede lograr más rápido aumentando el tamaño del paso). Las siguientes temperaturas constantes se utilizaron para el cuerpo más grande para obtener la constante de Stefan-Boltzmann: 45, 50, 55 y 60 °C.
3. La constante de Stefan-Boltzmann se calculó como $\sigma = J/\varepsilon(T_{surr}^4 - T_{obj}^4)$ con $J = \dot{Q}/A$ como flujo o potencia emisiva.
4. Se comparó el valor real $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ con el calculado en cada experimento virtual.

Discusión

Durante una sesión sincrónica, se mostró un boceto que representó el experimento con instrucciones verbales y escritas (ver Figura 4a). Luego, los estudiantes reprodujeron el boceto utilizando las opciones de dibujo en Energy2D (Figura 2b), asegurándose de que sus bocetos cumplieran con los requisitos cualitativos de las dimensiones relativas entre los objetos y que los sensores de temperatura y flujo estuvieran colocados correctamente. En la Figura 4c se observa cómo se alcanzó el estado estacionario en el entorno virtual. En la Figura 4d se observan los resultados de la constante de Stefan-Boltzmann para las diferentes temperaturas del cuerpo grande comparadas con el valor real. Tenga en cuenta que hay una pequeña imprecisión debido al factor de visualización. En la Figura 4e se ve la evolución de la temperatura con respecto al tiempo, notando que este experimento tuvo una dinámica más lenta en comparación con otros mecanismos de transferencia de calor con diferencias de temperatura similares.

La radiación térmica se volvió más relevante a altas temperaturas, sin embargo, el gradiente definido para este experimento fue pequeño y se puede reproducir de forma segura en un laboratorio en una configuración real.

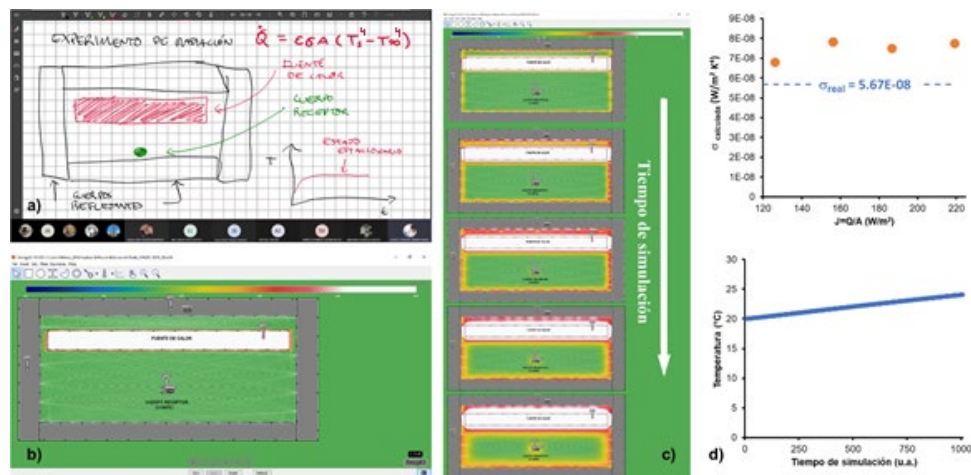


Figura 4. Diseño del experimento del laboratorio virtual. a) Captura de pantalla de una sesión sincrónica, b) captura de pantalla de la configuración del experimento de laboratorio utilizando el software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de transferencia de calor por radiación, d) Representación matemática obtenida del fenómeno de transferencia de calor.

3.3 Validación estadística de la hipótesis del trabajo de investigación.

La Figura 5 muestra la distribución de calificaciones obtenidas para los estudiantes en los periodos 2018, 2019, 2020 y 2021, así como un análisis ANOVA para evaluar diferencias estadísticamente significativas entre grupos (periodos) con un nivel de confianza de 0.95. En la Figura 5a se observa que los promedios obtenidos son: Periodo 2018-02 = 7.38 ± 1.75 , Periodo 2019-02 = 6.76 ± 1.64 , Periodo 2020-02 = 6.95 ± 1.46 , Periodo 2021-02 = 8.11 ± 1.79 y Periodo 2021-03 = 5.85 ± 1.35 . A partir de la información anterior se realizó un análisis ANOVA de una vía (Figura 5b) obteniendo como resultado: $F(2, 79) = 10.118$; $p = 0.00012$; por la razón es posible concluir que no existen diferencias estadísticamente significativas entre periodos. La información anterior evidencia que la implementación de entornos virtuales de aprendizaje en asignaturas con laboratorio pertenecientes al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG (caso de estudio: Fenómenos de Transporte) permitió mantener operando los servicios educativos curriculares (Caso de estudio: Ingeniería Química, Ingeniería en Biotecnología e Ingeniería en Alimentos) durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2 (caso de estudio: Periodos 2020 y 2021) sin presentar alteraciones estadísticamente significativas con respecto a los dos años anteriores.

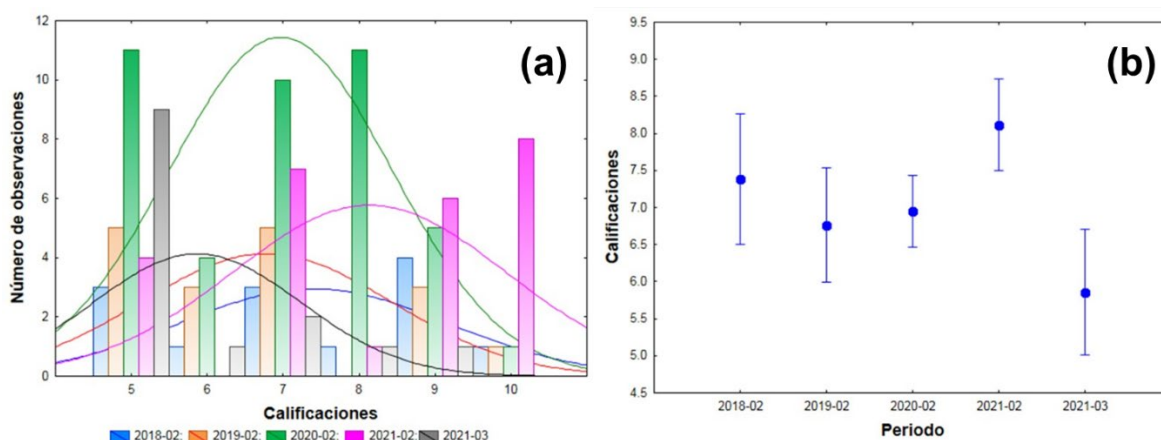


Figura 5. Evaluación estadística de la implementación de EVAs en la asignatura de Fenómenos de Transporte como estrategia para mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2: (a) Distribución de calificaciones y (b) Análisis ANOVA de una vía (las barras verticales denotan un nivel de confianza de 0.95)

4. Conclusiones

La integración y uso de un Entorno Virtual de Aprendizaje para estudiantes de ingeniería en los cursos de Transferencia de Calor y Fenómenos de Transporte permitió reproducir virtualmente las prácticas de laboratorio durante las restricciones escolares por el confinamiento exigido por la pandemia del COVID-19. La estrategia didáctica implementada fortaleció los recursos académicos, tecnológicos y didácticos de la UAG, brindando herramientas que permitieron implementar el modelo Blended learning (B-Learning) dentro de la universidad como estrategia para adecuar la metodología de enseñanza-aprendizaje a los desafíos actuales. Este modelo de enseñanza permitirá combinar diferentes espacios de aprendizaje en actividades presenciales y virtuales.

Las limitaciones del diseño del entorno virtual propuesto corresponden a: (a) la falta de conectividad o la conexión intermitente resulta perjudicial ya que evita la continuidad de las clases y, por tanto, retrasa el desarrollo educativo de los estudiantes. (b) la falta de interacción presencial con otros compañeros produce aislamiento en cualquier estudiante en línea. Para intentar solventarlo, se propone la interacción con compañeros y profesores a través de recursos como: mensajes online, correo electrónico, participación en foros y videollamadas. (c) la ejecución del curso online puede provocar problemas de salud, tales como dolor en la espalda y hombros. La solución más factible es brindar cursos flexibles que permitan darle más tiempo libre a los estudiantes para descansar durante

el proceso.

Finalmente, es importante señalar que las principales contribuciones de este trabajo al estado del arte de la ciencia, tecnología o qué hacer educativo son: (a) Investigación en innovación educativa aplicado en estrategias educativas hacia el aprendizaje activo. (b) Aplicación de herramientas digitales y software de acceso gratuito para el fortalecimiento profesional de estudiantes en formación del área de Ingeniería. (c) Fortalecimiento del programa B-Learning de la Universidad Autónoma de Guadalajara.

Financiamiento y/o Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología y el Departamento de Biotecnológicas y Ambientales de la Universidad Autónoma de Guadalajara para la realización de este proyecto. También agradecemos a la Dra. Ana I. Zárate-Guzmán por sus valiosos comentarios durante el desarrollo de este proyecto. W.M.W-V, J.E.C.P-G y S.D.S-V agradecen a la Universidad Autónoma de Guadalajara por la beca recibida para completar sus estudios de pregrado.

Referencias

- Alanís Navarro, J. A., Castillo Téllez, M., Rivera Martínez, M. A., Pedroza Silvar, G., & Martínez Tejeda, F. C. (2019). Computational thermal analysis of a double slope solar still using Energy2D. *Desalination and Water Treatment*, 151, 26–33. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23811>
- Araújo, F. J. de O., de Lima, L. S. A., Cidade, P. I. M., Nobre, C. B., & Neto, M. L. R. (2020). Impact Of Sars-Cov-2 And Its Reverberation In Global Higher Education And Mental Health. *Psychiatry Research*, 288, 112977. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2020.112977>
- Arneson, J. B., & Offerdahl, E. G. (2018). Visual literacy in Bloom: Using Bloom's Taxonomy to Support Visual Learning Skills. *CBE Life Sciences Education*, 17(1), 1–8. <https://doi.org/10.1187/cbe.17-08-0178>
- Assunção Flores, M., & Gago, M. (2020). Teacher education in times of COVID-19 pandemic in Portugal: national, institutional and pedagogical responses. *Journal of Education for Teaching*, 46(4), 507–516. <https://doi.org/10.1080/02607476.2020.1799709>
- Banderas, A. V. (1988). *Problemas de Transferencia de Calor* (Primera). Limusa.
- Bawa, P. (2020). Learning in the age of SARS-COV-2: A quantitative study of learners' performance in the age of emergency remote teaching. *Computers and Education Open*, 1, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2020.100016>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2020). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Eighth). Wiley.
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C., & Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: A new challenge? *Virtual Reality*, 12(3), 151–161. <https://doi.org/10.1007/s10055-008-0093-y>
- Chou, S. W., & Liu, C. H. (2005). Learning effectiveness in a Web-based virtual learning environment: a learner control perspective. *Journal of Computer Assisted Learning*, 21(1), 65–76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2005.00114.x>
- Davidovitch, L., Parush, A., & Shtub, A. (2006). Simulation-based Learning in Engineering Education: Performance and Transfer in Learning Project Management. *Journal of Engineering Education*, 95(4), 289–299. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00904.x>
- Davidzon, M. I. (2012). Newton's law of cooling and its interpretation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), 5397–5402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.035>
- Davis, K., Christodoulou, J., Seider, S., & Gardner, H. (2011). *The Theory of Multiple Intelligences*.

- In Handbook of Educational Ideas and Practices (pp. 485–503). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511977244.025>
- Fang, N. (2012). Using Computer Simulation and Animation to Improve Student Learning of Engineering Dynamics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 56, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.682>
- Flynn, A. M., Akashige, T., & Theodore, L. (2019). *Kern's Process Heat Transfer (Second)*. John Wiley & Sons.
- Fraser, D. M., Pillay, R., Tjatindi, L., & Case, J. M. (2007). Enhancing the Learning of Fluid Mechanics Using Computer Simulations. *Journal of Engineering Education*, 96(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2007.tb00946.x>
- Fu, T. T. (2003). Applications of computer simulation in mechanism teaching. *Computer Applications in Engineering Education*, 11(3), 156–165. <https://doi.org/10.1002/cae.10043>
- García-Alberti, M., Suárez, F., Chiyón, I., & Mosquera Feijoo, J. C. (2021). Challenges and Experiences of Online Evaluation in Courses of Civil Engineering during the Lockdown Learning Due to the COVID-19 Pandemic. *Education Sciences*, 11(59). <https://doi.org/10.3390/educsci11020059>
- Gillet, D., Latchman, H., Salzmann, C., & Crisalle, O. (2001). Hands-On Laboratory Experiments in Flexible and Distance Learning. *Journal of Engineering Education*, 90(2), 187–191. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2001.tb00589.x>
- Horton, W. (2000). *Designing Web-based training: how to teach anyone anything anywhere anytime*. Wiley.
- Johnson-Glauch, N., Choi, D. S., & Herman, G. (2020). How engineering students use domain knowledge when problem-solving using different visual representations. *Journal of Engineering Education*, 109(3), 443–469. <https://doi.org/10.1002/jee.20348>
- Joseph Fourier, J. B., & Freeman, A. (1878). *THE ANALYTICAL THEORY OF HEAT (First)*. Cambridge University Press.
- Kirchhoff, G. (1860). I. On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(130), 1–21.
- Koh, C., Tan, H. S., Tan, K. C., Fang, L., Fong, F. M., Kan, D., Lin Lye, S., & Lin Wee, M. (2010). Investigating the Effect of 3D Simulation-Based Learning on the Motivation and Performance of Engineering Students. *Journal of Engineering Education*, 99(3), 237–251. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2010.tb01059.x>
- Kozaris, I. A. (2010). Platforms for e-learning. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397, 893–898. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-3587-x>
- Lapitan Jr., L. D., Tiangco, C. E., Sumalinog G., D. A., Sabarillo, N. S., & Diaz, J. M. (2021). An effective blended online teaching and learning strategy during the COVID-19 pandemic. *Education for Chemical Engineers*, 35, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.012>
- Malgieri, M., & Onorato, P. (2020). Teaching the heat transfer law using a stochastic toy model. *European Journal of Physics*, 41(1). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab3746>
- Ożadowicz, A. (2020). Modified Blended Learning in Engineering Higher Education during the COVID-19 Lockdown — Building Automation Courses Case Study. *Education Sciences*, 10(10), 292. <https://doi.org/doi:10.3390/educsci10100292>
- Prince, M., & Felder, R. (2006). Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123–138. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>
- Rodríguez, R. R., & Niño, Z. (2016). Evaluación de Herramientas Computacionales Gratuitas para la Simulación de Procesos de Combustión en Motores de Encendido por Chispa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 977–984.

- Simone Fohrmann, L., Yu. Petrov, A., Lang, S., J alas, D., F. Krauss, T., & Eich, M. (2015). Single mode thermal emission. *Optics Express*, 23(21), 27672–27682. <https://doi.org/10.1364/OE.23.027672>
- Sutjahja, I. M., Assegaf, S., & Wonorahardjo, S. (2020). Digital Simulation as Learning Aid for Heat Flow in Solid Theoretical Understanding. *Journal of Physical Science and Engineering*, 5(1), 11–21. <https://doi.org/10.17977/um024v5i12020p011>
- Viner, R. M., Russell, S. J., Croker, H., Packer, J., Ward, J., Stansfield, C., Mytton, O., Bonell, C., & Booy, R. (2020). School closure and management practices during coronavirus outbreaks including COVID-19: a rapid systematic review. *The Lancet Child and Adolescent Health*, 4(5), 397–404. [https://doi.org/10.1016/S2352-4642\(20\)30095-X](https://doi.org/10.1016/S2352-4642(20)30095-X)
- Vlachos, J., Hertegård, E., & Svaleryd, H. B. (2021). The effects of school closures on SARS-CoV-2 among parents and teachers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(9), 1–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020834118>
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., & Franchini, C. S. (1999). *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Limusa.
- Xie, C. (2012). Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone. *The Physics Teacher*, 50(4), 237–240. <https://doi.org/10.1119/1.3694080>
- Zapata-Garibay, R., Gonzalez-Fagoaga, J. E., Meza-Rodriguez, E. B., Salazar-Ramirez, E., Plascencia-Lopez, I., & Gonzalez-Fagoaga, C. J. (2021). Mexico’s Higher Education Students’ Experience During the Lockdown due to the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in Education*, 6. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.683222>
- Zheng, L., & Zhang, X. (2017). Numerical Methods. In Liancun Zheng & X. Zhang (Eds.), *Modeling and Analysis of Modern Fluid Problems* (First, pp. 361–455). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811753-8.00008-6>