

Simulación termodinámica en Matlab, aplicación en la pedagogía de la ingeniería

Thermodynamic simulation in matlab, application in engineering pedagogy

Debrayan Bravo Hidalgo¹ (dbrayanbh@gmail.com) (<http://orcid.org/0000-0003-0428-2263>)

Alexander Báez Hernández² (alexbaez1995@hotmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-0786-7307>)

Resumen

El objetivo de este artículo es mostrar las potencialidades de la simulación termodinámica, con fines pedagógicos en el área de la ingeniería. Para lograr este objetivo, esta contribución se estructura en las siguientes partes: Sinopsis bibliométrica de esta temática, laboratorio de termodinámica, ejemplo de simulación termodinámica en MATLAB, y por ultimo las potencialidades pedagógicas del entorno de simulación.

Palabras clave: Simulación en MATLAB, laboratorio de termodinámica, enseñanza y aprendizaje.

Abstract

The aim of this article is to show the potentialities of thermodynamic simulation for pedagogical purposes in the area of engineering. To achieve this objective, this contribution is structured in the following parts: Bibliometric synopsis of this topic, thermodynamics laboratory, example of thermodynamic simulation in MATLAB, and finally the pedagogical potentialities of the simulation environment.

Key words: MATLAB simulation, thermodynamics laboratory, teaching and learning.

Las prácticas en los laboratorios han tenido un rol central y distintivo en la formación de ingenieros y científicos en las más diversas ramas del saber (Hennessy, Deane, Ruthven y Winterbottom, 2007; Hodgdon, 1919; Vázquez-Bernal, Jiménez-Pérez y Jiménez, 2019). El profesorado siempre ha defendido los muchos beneficios de aprender de las actividades en laboratorio (Lorenzo, Farré y Rossi, 2018; Smirnov, 2019). A pesar de las muchas ventajas reales de los laboratorios, estos, tienen algunas desventajas serias (Coursey y Bozeman, 1992)

Quizás las mayores desventajas de los laboratorios de ingeniería son el costo de establecerlos, los costos de mantenimiento y, quizás lo más importante, el hecho de que la ingeniería es un campo en evolución y los laboratorios necesitan constantemente ser actualizados con nuevos equipos (Auer, Pester, Ursutiu y Samoila, 2003; Sáenz,

¹ Máster en Eficiencia Energética. Ingeniero Mecánico. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.

² Doctor of Philosophy(PhD). Máster en Contabilidad Gerencial. Ingeniero Hidráulico, Universidad Tecnológica de la Habana (ISPJAE). Profesor-Investigador de la Universidad Central del Ecuador.

Chacón, De La Torre, Visioli y Dormido, 2015; Stone, Stroock y Ajdari, 2004). Los laboratorios están equipados con instrumentos y dispositivos de trabajo real y estos equipos tienen una vida útil limitada, por lo que necesitan reparación y mantenimiento, especialmente a medida que el equipo envejece. Estas últimas observaciones pueden ser muy evidentes y cotidianas para las personas que operamos en laboratorios en universidades y centros de investigación.

Los laboratorios son una parte integral de cualquier curso de ingeniería. Proporcionan a los estudiantes una directa exposición a instrumentos y dispositivos de ingeniería reales y similares a los que emplearán en sus vidas profesionales (Dueñas y Rincón, 2019; Tanak, 2018). También proporciona oportunidades para que los estudiantes aprendan y valoren el trabajar en equipo. Dado que esto es una vital herramienta para el óptimo futuro desempeño profesional del alumno.

Por otra parte, los laboratorios permiten consolidar los conocimientos e información adquirida en el programa de estudios. Después de que los estudiantes hayan aprendido la teoría en clase, estarán mejor preparados para realizar experimentos de laboratorio y aprender cómo se comportan los diversos instrumentos, dispositivos y equipos en entornos de la vida real (Lamb y Firestone, 2018; Serikov, 2017). Además de las ventajas anteriormente mencionadas, algunos conceptos se aprenden mejor a través de la exploración de laboratorio, ejemplo de ellos son, por mencionar algunos: el análisis de errores, fluctuaciones, incertidumbre, ruido, etc. (Duran y Usak, 2015; Karamustafaoğlu, Bardak y Doğan Erkoç, 2018).

Como solución a los problemas asociados con los laboratorios, muchas instituciones tienden a usar laboratorios virtuales en forma de simulaciones por computadora. La simulación generalmente es un programa de computadora que se ejecuta en los ordenadores o PC (*Personal Computer*) y los estudiantes pueden reproducir y usar el programa en sus ordenadores personales, lo que resulta en un costo mucho más bajo (Augier, Laroche y Brehon, 2008; Day y otros, 2012; Khosronejad, Hill, Kang y Sotiropoulos, 2013). El costo de establecer un laboratorio virtual es mucho menor que el costo de establecer laboratorios reales.

Además, no hay costos de mantenimiento o reparación. El entorno de laboratorio se puede actualizar simplemente actualizando los programas de simulación existentes a versiones de software más nuevas. Los laboratorios virtuales también tienen la ventaja adicional de que pueden usarse en cursos de educación en ingeniería a distancia, donde los estudiantes pueden recibir reproducciones de programas de simulación para que puedan realizar varios experimentos en la comodidad de sus hogares o espacios preferidos y en todo momento (Cho y Lee, 2016; Tetko y otros, 2005)

La simulación se define como un evento estructurado que involucra relaciones causales entre el elemento y el evento que representa una situación en el mundo real (Garland, Dickerman, Janis y Jones, 1993; Stillinger y Weber, 1985; Swope, Andersen, Berens y

Wilson, 1982). Delval (1986, p. 21) define la simulación como “la reproducción de una situación o un fenómeno que generalmente se simplifica y que, a su vez, permite la manipulación de sus variables mediadoras”. En este sentido, las simulaciones deben constituir un "modelo de situación o fenómeno, en el que aparecen los aspectos que se consideran importantes para nuestro propósito, descuidando así aquellos que son secundarios o accesorios" Delval (1986, p. 34).

Por lo tanto, un modelo de entorno o simulación tiene como objetivo representar el desarrollo de la realidad de manera parcial, en otras palabras, trata de representar en parte el funcionamiento de un sistema real (Oden y Martins, 1985). En este caso, la simulación por computadora es la representación digital de una parte de la realidad, que se expresa a través de un sistema de información virtual manipulable que puede ser natural, artificial o imaginario. A partir de los conceptos esbozados anteriormente, es pertinente unificar dos palabras que se vuelven indispensables en la interpretación del término simulación (Gao, Liu, y Dougal, 2002; Keating y otros, 2003).

- a) Sistema: es "una colección o conjunto de elementos o normas que se ordenan para cumplir un propósito particular" (Martínez, Técnica, y Requena, 1986). Germán Amaya Franky (2009, p. 87), un sistema es un conjunto de objetos o ideas que se interrelacionan entre sí como una unidad para el logro de un fin lógico. Asimismo, en la contribución de (Ayala, 2009, p. 9) se define sistema como la porción del universo que será el objeto de la simulación. Por lo tanto, las definiciones anteriores sugieren que la característica esencial de un sistema es la interrelación entre cada una de sus partes en relación con ciertas reglas enmarcadas dentro de un objetivo. En consecuencia, un sistema puede realizar una función que sus componentes no pueden realizar de forma particular.
- b) Modelo: es un objeto o evento que puede ser utilizado por un individuo para investigar y responder a aspectos de su interés en relación con el objeto o evento real. En la contribución de Germán Amaya Franky (2009, p. 152).se expresa que: un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede usar a X para responder preguntas que le interesan sobre Y. En ese sentido, un modelo de simulación es según Rodríguez-Aragón (2011, p. 26) es “el conjunto de hipótesis sobre el funcionamiento del sistema expresadas como relaciones matemáticas y / o lógicas entre los elementos del sistema”.

En este contexto el propósito de esta contribución es demostrar las potencialidades de las simulaciones termodinámicas por computadora mediante un ejemplo práctico desarrollado en el software MATLAB. De los muchos ejemplos de aplicaciones de procesos de simulación en el ámbito ingenieril, se selecciona un análisis termodinámico, dado que los experimentos reales de estos estudios involucran muchos equipos y recursos, en comparación con estudios en laboratorios de electrónica, eléctrica, química, etc. Lo que justifica el propósito de esta investigación.

Sinopsis bibliométrica de la temática tratada

Utilizando los criterios de búsqueda " *Engineering simulation with MATLAB* " en el tema, en el director académico Web of Science, se detectaron 11 635 documentos. La Figura 1 muestra el comportamiento de las publicaciones científicas en este tema, en los últimos 10 años. Para obtener esta figura se emplearon las herramientas de análisis bibliométrico que el directorio académico Scopus brinda a sus suscriptores. Es prudente destacar que para ello se empleó el mismo criterio de búsqueda anteriormente mencionado. Se puede ver que esta práctica tiende a crecer dentro de la comunidad científica internacional.

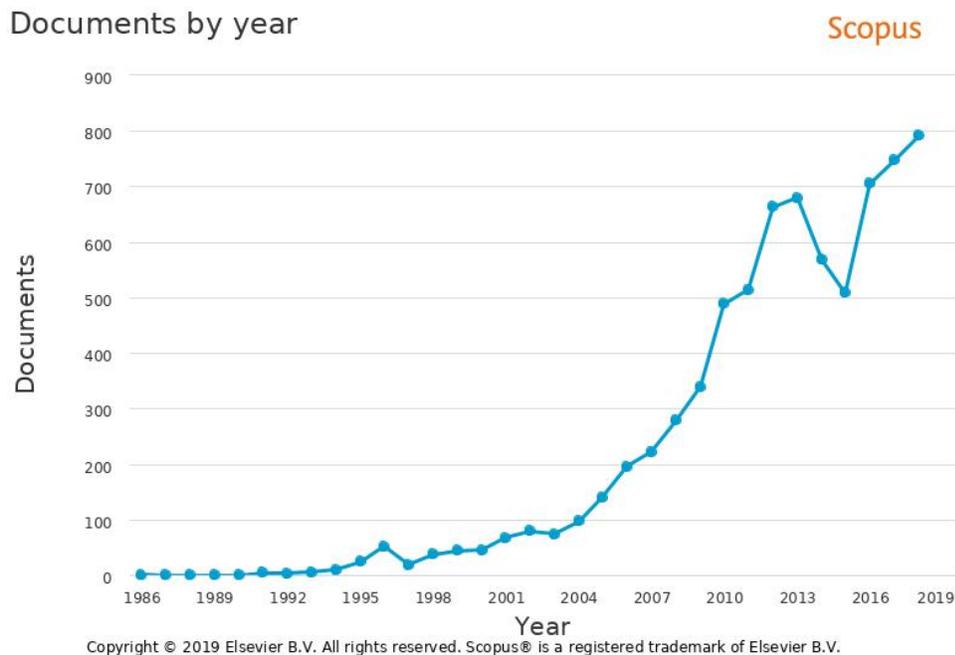


Figura 1. Número de contribuciones científicas por año.

La Figura 2 muestra la distribución de las contribuciones científicas en la temática tratada, por área del conocimiento. Se puede distinguir que la ingeniería tiene una mayor representación. Las empresas de ingeniería tienen el mayor número de trabajos dentro del directorio académico Web of Science.

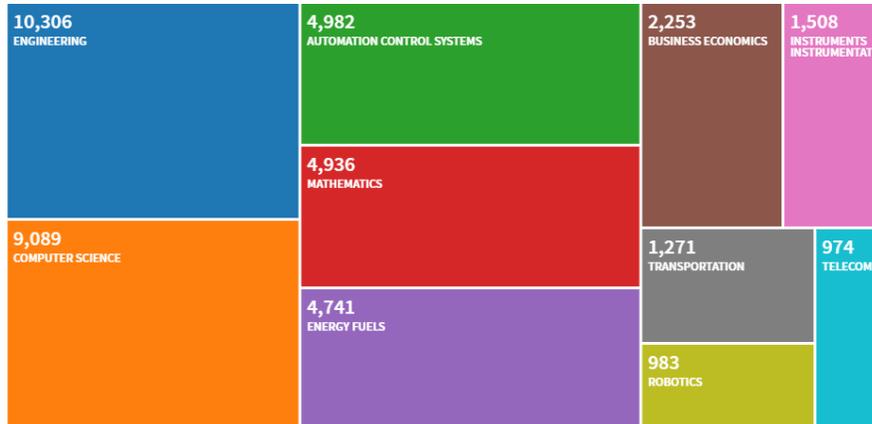


Figura 2. Distribución de aportes científicos por área de conocimiento en cuanto a simulaciones de procesos ingenieriles.

Las potencias del eje económico mundial, ven la simulación por ordenador una alternativa efectiva y confiable en la preparación científica de sus estudiantes de ingeniería. La Figura 3 muestra la distribución de los resultados científicos publicados que respaldan lo anteriormente declarado.

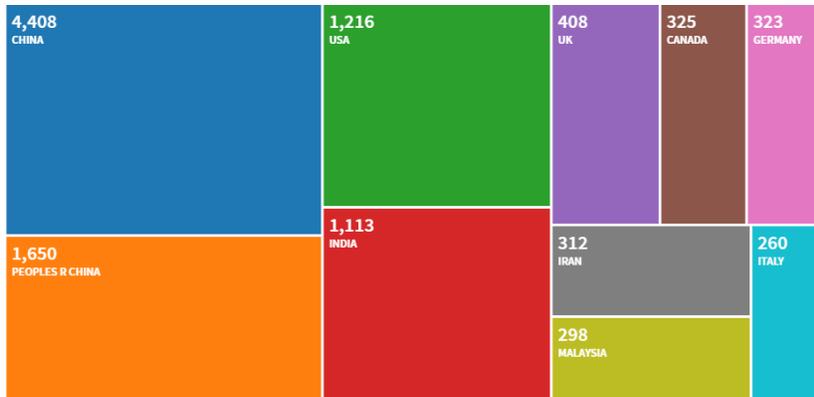


Figura 3. Distribución mundial de contribuciones científicas que se fundamentan en procesos de simulación computarizada.

Laboratorio de termodinámica

Los estudios termodinámicos que realizan los estudiantes de ingeniería, en los laboratorios; requieren equipos abundantes, complejos, caros y, en algunos casos, peligrosos en su funcionamiento (Gomez-Rivas y Pincus, 2007; Koretsky, 2016). Ver figura 4. Estas prácticas de los estudiantes se desarrollan bajo estricta supervisión de profesores y técnicos especializados en el manejo de instrumentos, herramientas y equipos relacionados con la práctica de laboratorio especificada (Koretsky, 2014). Actualmente, la instalación de un laboratorio de termodinámica en una universidad oscila entre \$ 5,000 y \$ 25,000; y su mantenimiento anual de \$ 800 a \$ 2 000

dependiendo de la intensidad de uso. Por otro lado, el número de estudiantes que pueden asistir a una práctica de laboratorio está limitado por las características de las instalaciones (Bowen, Reid, y Koretsky, 2014).

A diferencia, las simulaciones termodinámicas realizadas en el software MATLAB permiten a los estudiantes desarrollar sus laboratorios de forma segura, mucho más funcional y con costos insignificantes. Todo esto no significa, de ninguna manera, que los laboratorios reales; No son necesarios. En laboratorios reales los estudiantes adquieren un grupo de habilidades y conocimientos a los que no pueden acceder en un laboratorio virtual o simulación por ordenador.



Figura 4. Laboratorio de termodinámica.

Ejemplo de simulación termodinámica en MATLAB

Este ejemplo muestra cómo simular el funcionamiento de un sistema automático de control de clima en un automóvil utilizando Simulink y Stateflow. Ver figura 5. Puede ingresar un valor de temperatura que le gustaría que alcance el aire interior en el automóvil haciendo doble clic en el Punto de ajuste del usuario en el bloque en grados Celsius e ingresando el valor de temperatura. También puede establecer la temperatura externa en grados Celsius de manera similar. La pantalla numérica en el lado derecho del modelo muestra la lectura de un sensor de temperatura colocado detrás de la cabeza del conductor. Esta es la temperatura que debe sentir el conductor. Cuando se ejecuta el modelo y el control de clima está activo, es este cuadro de visualización mostrar el cambio de temperatura en el automóvil en el interior de la cabina del automóvil.

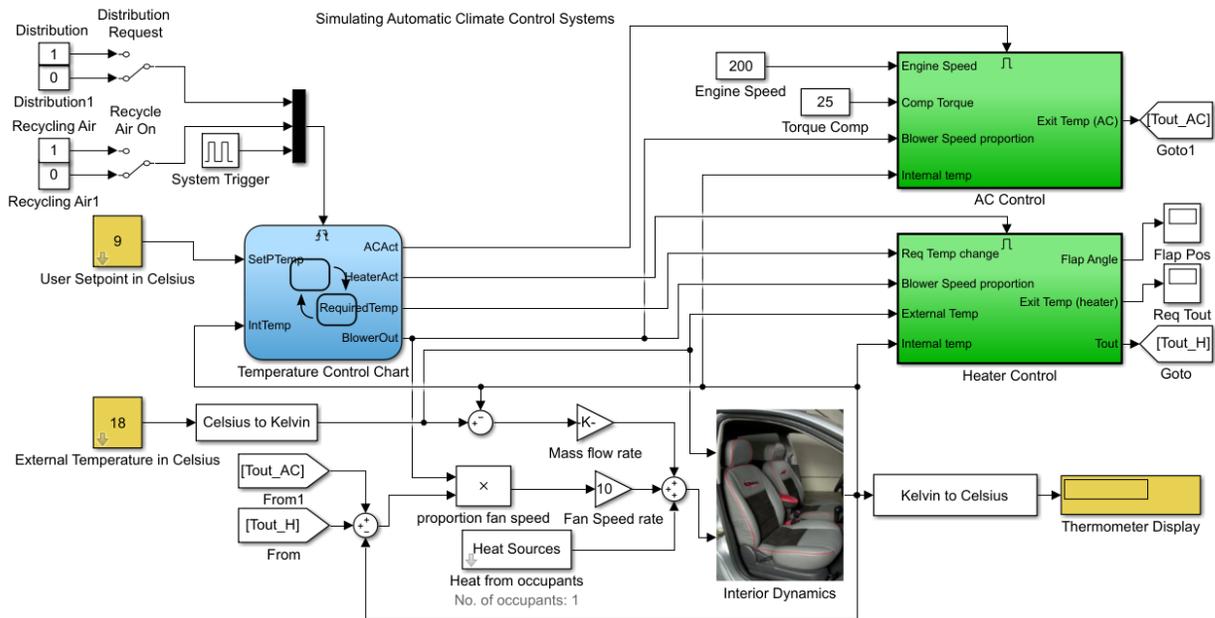


Figura 5. Sistema automático de control de clima en el interior de vehículo.

Controlador de flujo de estado

El controlador de supervisión se implementa en Stateflow. Al hacer doble clic en el gráfico Stateflow, se muestra cómo se ha formulado esta lógica de control de supervisión. El estado Heater_AC muestra que cuando ingresa una temperatura de punto de ajuste que es mayor que la temperatura actual en el automóvil en al menos 0.5 °C, el sistema de calefacción se encenderá. El calentador permanecerá activo hasta que la temperatura actual en el automóvil esté dentro de 0.5 °C de la temperatura del punto de ajuste. De manera similar, cuando el usuario ingresa un punto de ajuste que es 0.5 °C (o más) más bajo que la temperatura actual del automóvil, el aire acondicionado se enciende y permanece activo hasta que la temperatura del aire en el automóvil esté dentro de 0.5 °C de la temperatura del punto de ajuste, después de lo cual, el sistema se apagará. Se ha implementado un rango inactivo de 0,5 °C para evitar el problema de la conmutación continua.

En el estado del Blower, cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura de consigna y la temperatura actual, más fuerte sopla el ventilador. Esto asegura que la temperatura alcanzará el valor requerido en un período de tiempo razonable, a pesar de la diferencia de temperatura. Una vez más, cuando la temperatura del aire en el automóvil está dentro de los 0.5 °C de la temperatura del punto de ajuste, el sistema se apagará.

La distribución de aire (AirDist) y los estados de reciclaje de aire (Recyc_Air) están controlados por los dos interruptores que activan el diagrama de flujo de estado. Ver figura 6. Se ha implementado una transición interna dentro de estos dos estados para

facilitar la descongelación efectiva de las ventanas cuando sea necesario. Cuando se activa el estado de descongelamiento, el aire reciclado se desactiva.

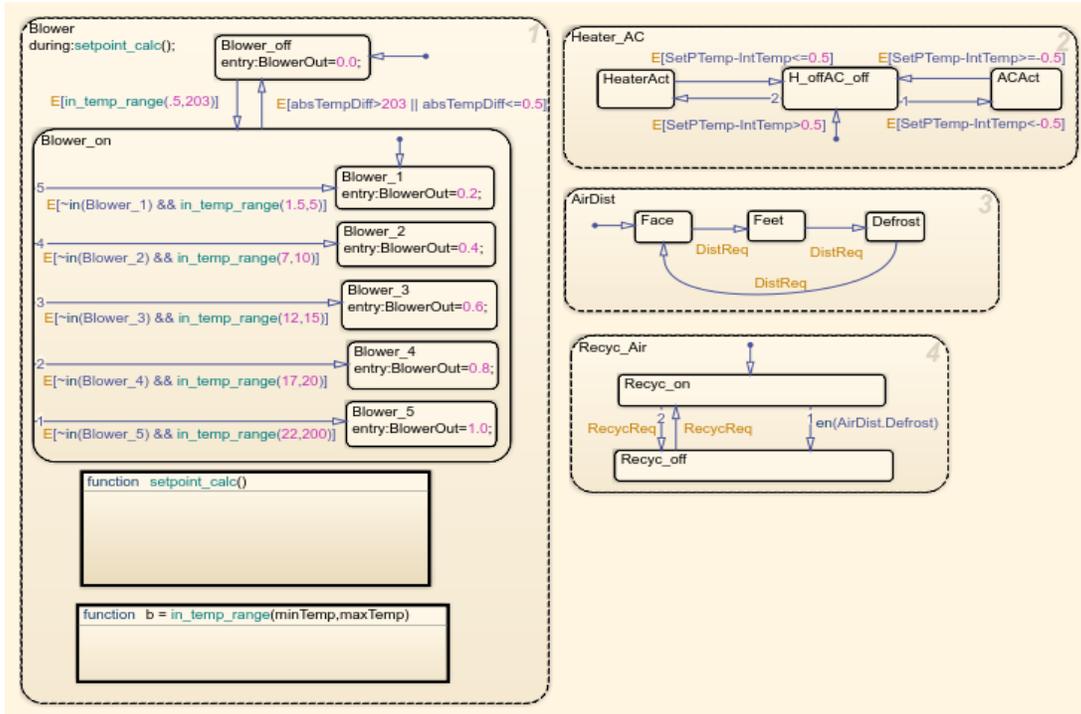


Figura 6. Lógica de control de supervisión en Stateflow.

Modelos de calefacción y aire acondicionado

El modelo de calentador se construyó a partir de la ecuación para un intercambiador de calentadores que se muestra a continuación:

$$T_{out} = T_S - (T_S - T_{in}) e^{[-\pi \cdot D \cdot L \cdot hc] / (m \cdot \dot{c} \cdot Cp)}$$

Dónde:

T_s = constante (temperatura de la pared del radiador)

D = 0.004m (diámetro del conducto)

L = 0.05m (grosor del radiador)

N = 30000 (número de canales)

k = 0.026 W / m * K = constante (conductividad térmica del aire)

Cp = 1007 J / kg * K = constante (calor específico del aire)

Flujo laminar (hc = 3.66 (k / D) = 23.8 W / m² * K)

Además, se tiene en cuenta el efecto de la aleta del calentador. Similar al funcionamiento del ventilador (Blower), cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre la temperatura de consigna requerida y la temperatura actual en el automóvil, más se abre la tapa del calentador y mayor es el efecto de calentamiento. El modelo de aire acondicionado fue construido a partir de la siguiente ecuación:

$$y * (w * T_{comp}) = m - \dot{m} * (h_4 - h_1)$$

Donde:

y = eficiencia

m_dot = caudal másico

w = velocidad del motor

Tcomp = par del compresor

h4, h1 = entalpía

Aquí tenemos el control del sistema de A/C, donde la temperatura del aire que sale del A/C está determinada por la velocidad del motor y el par del compresor. Ver figuras 7 y 8.

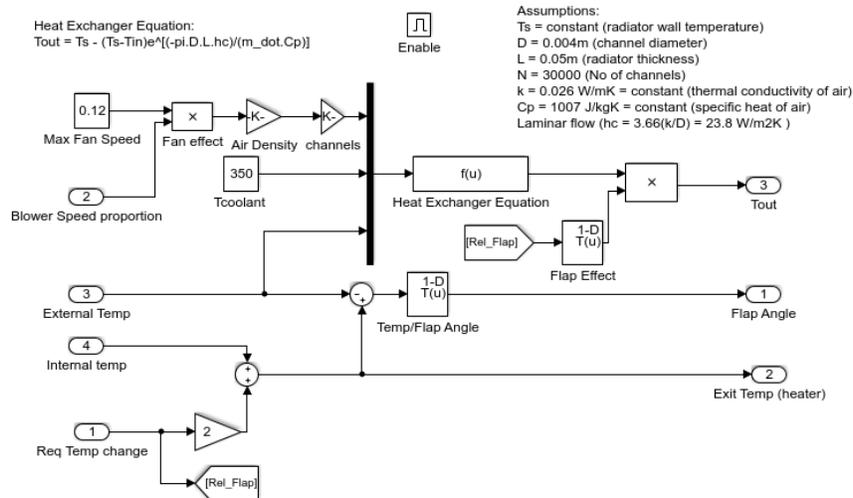


Figura 7. Subsistema de control del calentador.

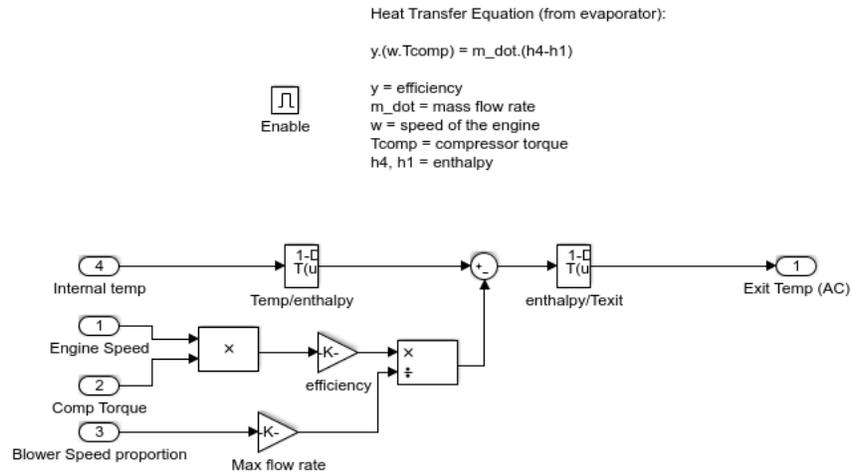


Figura 8. Subsistema de control de A / C.

Transferencia de calor en la cabina

La temperatura del aire que siente el conductor se ve afectada por todos estos factores: la temperatura del aire que sale de los respiraderos, la temperatura del aire exterior y el número de personas en el auto.

Estos factores son entradas al modelo termodinámico del interior de la cabina. Tomamos en cuenta la temperatura del aire que sale de los respiraderos calculando la diferencia entre la temperatura del aire de ventilación y la temperatura actual dentro del automóvil y multiplicándola por la proporción de velocidad del ventilador (caudal másico). Luego se agregan 100 W de energía por persona en el automóvil. Por último, la diferencia entre la temperatura del aire exterior y la temperatura del aire interior se multiplica por un caudal másico menor para tener en cuenta el aire que irradia al automóvil desde el exterior. La salida del modelo de dinámica interior se alimenta al bloque de visualización como una medida de la temperatura leída por un sensor colocado detrás de la cabeza del conductor.

Potenciales pedagógicos de entornos de simulación

A partir de una revisión de los antecedentes que enmarca esta investigación, es evidente que los entornos de simulación son recursos que presentan diversas contribuciones al sector educativo (Deshpande y Huang, 2011; Fureby, 2008). Sin embargo, la efectividad de las herramientas utilizadas en el proceso de enseñanza y aprendizaje no depende solo de los artefactos, existen diversos factores que influyen directamente, tales como: estilos, ritmos, preferencias, habilidades, estrategias de aprendizaje y antecedentes o preparación del estudiante en asignaturas básicas (Liu, Ong, y Cai, 2018; Lorenzo y otros, 2018). De esta declaración se puede concluir: “el

aprendizaje depende esencialmente del alumno, no directamente de lo que el maestro quiere o pretende, según Gimeno Sacristán" (1998, p. 23).

El orientador debe reconocer en los contextos un elemento potenciador de las motivaciones que conducen a generar aprendizaje (Fraser, 2017; Karamustafaoğlu y otros, 2018). El entorno educativo apropiadamente prediseñado aumenta las posibilidades de los individuos para la construcción del conocimiento, porque el factor pedagógico de los entornos depende en gran medida de la metodología utilizada (Bahcivan y Cobern, 2016; Hammond et al., 2018); entendido como la ciencia que estudia los métodos, técnicas, procedimientos y medios dirigidos a la enseñanza de una disciplina determinada. Por lo tanto, las tecnologías deben verse como herramientas para implementar los métodos y no como métodos en sí mismos (Kang, Donovan, y McCarthy, 2018; Nurzhumbayeva, Burdina, Kozhayeva, Temerbayeva, y Bulyga, 2019; Soysal, 2018).

El uso de elementos tecnológicos, como los simuladores computarizados, debe verse como un recurso que media y potencia a los aprendices en la construcción del conocimiento (Garay y otros, 2016). Las simulaciones computarizadas deben verse como recursos técnicos de naturaleza material, que facilitan la interacción, el estudio y / o el modelado de la realidad del estudiante o una parte de ella (Pratto y Knox, 1973). Desde esta perspectiva, las computadoras personales constituyen medios técnicos de especial importancia para el contexto metodológico contemporáneo (Chiesl, 1978; Whitworth, Leupen, Rakes, y Bustos, 2018) y no elementos pedagógicos por sí mismos.

Conclusiones

En resumen, el valor pedagógico y didáctico de los entornos de simulación lo proporciona el contexto metodológico en el que se explotan sus cualidades. Si la simulación se considera un recurso que facilita la ejecución de metodologías educativas y, en consecuencia, de procedimientos de aprendizaje. ¿Pudieran clasificarse los entornos de simulación conforme a una metodología?

Para que los entornos simulación puedan ser catalogados como una metodología, debería ser suficiente por sí misma para penetrar en la esencia de la realidad, y este no es el caso, ya que el modelado o simulación de un evento real no es un hecho suficiente para esa interacción significativa (Appleton, 2013; Arvanitis et al., 2009). A partir de aquí, es necesario utilizar procedimientos que ayuden secuencialmente en la interpretación de esa realidad.

Por otro lado, y desde un enfoque sociocultural del aprendizaje, las simulaciones por sí solas no pueden generar eventos sociales e interacciones o sistemas colaborativos; Es cierto que generan un entorno común de significados, pero que dependen de un proceso metodológico que induce a la reflexión. En consecuencia, las simulaciones deben reconocerse como elementos que coaccionan con la metodología en el proceso

de enseñanza y aprendizaje, porque las simulaciones son instrumentos del método que corresponden a una parte de las actividades que integran un diseño metodológico.

Referencias

- Appleton, K. (2013). Science pedagogical content knowledge and elementary school teachers. *Elementary Science Teacher Education: International Perspectives on Contemporary Issues and Practice* (pp. 31-54): Taylor and Francis.
- Arvanitis, T. N., Petrou, A., Knight, J. F., Savas, S., Sotiriou, S., Gargalacos, M., y Gialouri, E. (2009). Human factors and qualitative pedagogical evaluation of a mobile augmented reality system for science education used by learners with physical disabilities. *Personal and Ubiquitous Computing*, 13(3), 243-250.
- Auer, M., Pester, A., Ursutiu, D. y Samoila, C. (2003). *Distributed virtual and remote labs in engineering*. Paper presented at the 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT - Proceedings, Maribor.
- Augier, F., Laroche, C. y Brehon, E. (2008). Application of computational fluid dynamics to fixed bed adsorption calculations: Effect of hydrodynamics at laboratory and industrial scale. *Separation and Purification Technology*, 63(2), 466-474. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.seppur.2008.06.007>
- Bahcivan, E. y Cobern, W. W. (2016). Investigating coherence among Turkish elementary science teachers' teaching belief systems, pedagogical content knowledge and practice. *Australian Journal of Teacher Education*, 41(10), 63-86. Recuperado de <http://doi:10.14221/ajte.2016v41n10.5>
- Bowen, A. S., Reid, D. R. y Koretsky, M. (2014). *Development of interactive virtual laboratories to help students learn difficult concepts in thermodynamics*. Paper presented at the 121st ASEE Annual Conference and Exposition: 360 Degrees of Engineering Education, Indianapolis, IN.
- Chiesl, N. E. (1978). *A pedagogical exercise utilizing computer simulation*. Paper presented at the 10th Conference on Winter Simulation, WSC 1978.
- Cho, D. W. y Lee, K. (2016). English relative clauses in science and engineering journal papers: A comparative corpus-based study for pedagogical purposes. *Ampersand*, 3, 61-70. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.amper.2016.03.002>
- Coursey, D. y Bozeman, B. (1992). Technology transfer in U.S. government and university laboratories: Advantages and disadvantages for participating laboratories. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 39(4), 347-351. Recuperado de <http://doi:10.1109/17.165416>
- Day, M., Tachibana, S., Bell, J., Lijewski, M., Beckner, V. y Cheng, R. K. (2012). A combined computational and experimental characterization of lean premixed

- turbulent low swirl laboratory flames: I. Methane flames. *Combustion and Flame*, 159(1), 275-290. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.combustflame.2011.06.016>
- Delval, J. (1986). *Niños y máquinas: los ordenadores y la educación*. Madrid: Alianza.
- Deshpande, A. A. y Huang, S. H. (2011). Simulation games in engineering education: A state-of-the-art review. *Computer Applications in Engineering Education*, 19(3), 399-410. Recuperado de <http://doi:10.1002/cae.20323>
- Dueñas, W. R. R. y Rincón, A. M. R. (2019). *Interdisciplinary work as a pedagogical innovation for biomedical engineering and health science students*. Paper presented at the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, WC 2018.
- Duran, M. y Usak, M. (2015). Examining the pedagogical content knowledge of science teachers who have different teaching experience about acids and bases. *Oxidation Communications*, 38(1A), 540-557.
- Franky, G. A. (2009). Laboratorios reales versus laboratorios virtuales, en la enseñanza de la física. *El hombre y la Máquina*(33), 82-95.
- Franky, G. A. (2009). Potencialidades pedagógicas de los entornos de simulación, desde la perspectiva de la cognición situada. *Tecné Episteme y Didaxis TED*(25).
- Fraser, W. J. (2017). Science teacher educators' engagement with Pedagogical Content Knowledge and scientific inquiry in predominantly paper-based distance learning programs. *Turkish Online Journal of Distance Education*, 18(4), 35-51. Recuperado de <http://doi:10.17718/tojde.340375>
- Fureby, C. (2008). Towards the use of large eddy simulation in engineering. *Progress in Aerospace Sciences*, 44(6), 381-396. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.paerosci.2008.07.003>
- Gao, L., Liu, S. y Dougal, R. A. (2002). Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(3), 495-505. Recuperado de <http://doi:10.1109/TCAPT.2002.803653>
- Garay, G. R., Tchernykh, A., Drozdov, A. Y., Garichev, S. N., Nesmachnow, S. y Torres-Martinez, M. (2016). Visualization of VHDL-based simulations as a pedagogical tool for supporting computer science education. *Journal of Computational Science*. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.jocs.2017.04.004>
- Garland, T., Dickerman, A. W., Janis, C. M. y Jones, J. A. (1993). Phylogenetic analysis of covariance by computer simulation. *Systematic Biology*, 42(3), 265-292. Recuperado de <http://doi:10.1093/sysbio/42.3.265>
- Gimeno Sacristán, J. (1998). *De la publicación: Comprender y transformar la enseñanza*. Madrid, España: Editorial Morata.

- Gomez-Rivas, A. y Pincus, G. (2007). *Student automobile engines used in applied thermodynamics laboratory*. Paper presented at the 114th Annual ASEE Conference and Exposition, 2007, Honolulu, HI.
- Hammond, T. C., Bodzin, A., Anastasio, D., Holland, B., Popejoy, K., Sahagian, D. . . . y Farina, W. (2018). You know you can do this, right?: developing geospatial technological pedagogical content knowledge and enhancing teachers' cartographic practices with socio-environmental science investigations. *Cartography and Geographic Information Science*, 45(4), 305-318. Recuperado de <http://doi:10.1080/15230406.2017.1419440>
- Hennessey, S., Deaney, R., Ruthven, K. y Winterbottom, M. (2007). Pedagogical strategies for using the interactive whiteboard to foster learner participation in school science. *Learning, Media and Technology*, 32(3), 283-301. Recuperado de <http://doi:10.1080/17439880701511131>
- Hodgdon, D. R. (1919). The psychological and pedagogical basis of general science. *General Science Quarterly*, 3(2), 65-81. Recuperado de <http://doi:10.1002/sce.3730030201>
- Kang, E. J. S., Donovan, C. y McCarthy, M. J. (2018). Exploring Elementary Teachers' Pedagogical Content Knowledge and Confidence in Implementing the NGSS Science and Engineering Practices. *Journal of Science Teacher Education*, 29(1), 9-29. Recuperado de <http://doi:10.1080/1046560X.2017.1415616>
- Karamustafaoğlu, O., Bardak, S. y Doğan Erkoç, S. S. (2018). Investigation of pedagogical content knowledge of a science teacher based on the metacognitive awareness of her students. *Pegem Egitim ve Ogretim Dergisi*, 8(1), 119-154. Recuperado de <http://doi:10.14527/pegegog.2018.006>
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., . . . Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 267-288. Recuperado de [http://doi:10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](http://doi:10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Khosronejad, A., Hill, C., Kang, S. y Sotiropoulos, F. (2013). Computational and experimental investigation of scour past laboratory models of stream restoration rock structures. *Advances in Water Resources*, 54, 191-207. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.advwatres.2013.01.008>
- Koretsky, M. (2014). *Development and implementation of interactive virtual laboratories to help students learn threshold concepts in thermodynamics - Year 1*. Paper presented at the 121st ASEE Annual Conference and Exposition: 360 Degrees of Engineering Education, Indianapolis, IN.

- Koretsky, M. (2016). *Development and implementation of interactive virtual laboratories to help students learn threshold concepts in thermodynamics - Year 3*. Paper presented at the 123rd ASEE Annual Conference and Exposition.
- Lamb, R. y Firestone, J. B. (2018). Science Teacher Education as a Way Forward for Medical Schools: A Case for Medical Pedagogical Content Knowledge. *Journal of Science Teacher Education*, 29(3), 173-178. Recuperado de <http://doi:10.1080/1046560X.2018.1457866>
- Liu, H., Ong, Y. S. y Cai, J. (2018). A survey of adaptive sampling for global metamodeling in support of simulation-based complex engineering design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(1), 393-416. Recuperado de <http://doi:10.1007/s00158-017-1739-8>
- Lorenzo, M. G., Farré, A. S. y Rossi, A. M. (2018). University science teachers' education. Pedagogical knowledge and scientific research. *Revista Eureka*, 15(3). Recuperado de http://doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2018.v15.i3.3603
- Martínez, S., Técnica, L. y Requena, A. (1986). *Dinámica de sistemas v. 2: modelos*: Alianza.
- Nurzumbayeva, A., Burdina, E., Kozhayeva, S., Temerbayeva, Z. y Bulyga, L. (2019). Diagnostics of pedagogical staff readiness for teaching natural sciences in english. *Opcion*, 35(88), 321-345.
- Oden, J. T. y Martins, J. A. C. (1985). Models and computational methods for dynamic friction phenomena. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 52(1-3), 527-634. Recuperado de [http://doi:10.1016/0045-7825\(85\)90009-X](http://doi:10.1016/0045-7825(85)90009-X)
- Pratto, D. J. y Knox, W. E. (1973). The pedagogical impact of computer simulation: A small group example. *Social Science Information*, 12(6), 159-172. Recuperado de <http://doi:10.1177/053901847301200610>
- Rodríguez-Aragón, L. J. (2011). *Simulación, método de montecarlo*: Marzo.
- Sáenz, J., Chacón, J., De La Torre, L., Visioli, A. y Dormido, S. (2015). Open and Low-Cost Virtual and Remote Labs on Control Engineering. *IEEE Access*, 3, 805-814. Recuperado de <http://doi:10.1109/ACCESS.2015.2442613>
- Serikov, V. (2017). The teacher and pedagogical science: How to overcome the barrier? *Espacios*, 38(40).
- Smirnov, I. P. (2019). Pedagogical science in Russia: Much history, no strategies. *Obrazovanie i Nauka*, 21(3), 154-174. Recuperado de <http://doi:10.17853/1994-5639-2019-3-154-174>

- Soysal, Y. (2018). An exploration of the interactions among the components of an experienced elementary science teacher's pedagogical content knowledge. *Educational Studies*, 44(1), 1-25. Recuperado de <http://doi:10.1080/03055698.2017.1331839>
- Stillinger, F. H. y Weber, T. A. (1985). Computer simulation of local order in condensed phases of silicon. *Physical Review B*, 31(8), 5262-5271. Recuperado de <http://doi:10.1103/PhysRevB.31.5262>
- Stone, H. A., Stroock, A. D. y Ajdari, A. (2004) Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip, 36. *Annual Review of Fluid Mechanics* (pp. 381-411): Annual Reviews Inc.
- Swope, W. C., Andersen, H. C., Berens, P. H. y Wilson, K. R. (1982). A computer simulation method for the calculation of equilibrium constants for the formation of physical clusters of molecules: Application to small water clusters. *The Journal of Chemical Physics*, 76(1), 637-649. Recuperado de <http://doi:10.1063/1.442716>
- Tanak, A. (2018). Designing TPACK-based course for preparing student teachers to teach science with technological pedagogical content knowledge. *Kasetsart Journal of Social Sciences*. Recuperado de <http://doi:10.1016/j.kjss.2018.07.012>
- Tetko, I. V., Gasteiger, J., Todeschini, R., Mauri, A., Livingstone, D., Ertl, P. . . . Prokopenko, V. V. (2005). Virtual computational chemistry laboratory - Design and description. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 19(6), 453-463. Recuperado de <http://doi:10.1007/s10822-005-8694-y>
- Vázquez-Bernal, B., Jiménez-Pérez, R. y Jiménez, V. M. (2019). Pedagogical content knowledge (PCK) of a science teacher: Reflection and action as facilitators of learning. *Enseñanza De Las Ciencias*, 37(1), 25-53. Recuperado de <http://doi:10.5565/rev/ensciencias.2550>
- Whitworth, K., Leupen, S., Rakes, C. y Bustos, M. (2018). Interactive computer simulations as pedagogical tools in biology labs. *CBE Life Sciences Education*, 17(3). Recuperado de <http://doi:10.1187/cbe.17-09-0208>