

# Pensamiento Computacional para Ingenierías: Transformando el proceso de aprendizaje

Juan David Gómez<sup>1</sup>, Nicolás Guarín-Zapata<sup>1</sup>, Camilo Vieira<sup>2</sup>,  
Juan David Ortega-Alvarez<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT

<sup>2</sup>Instituto de Estudios en Educación, Universidad del Norte

<sup>3</sup>Department of Engineering Education, Virginia Tech

## Resumen

Esta innovación busca desarrollar habilidades en estudiantes de ingeniería civil utilizando estrategias basadas en evidencias. La innovación fue implementada en el área de Mecánica Computacional del programa de Ingeniería Civil de la Universidad EAFIT, la cual incluye los cursos de Modelación Computacional, Mecánica del Medio Continuo, e Introducción al Método de los Elementos Finitos. La transformación incluyó el simulador SolidsPy, que permite la creación de ambientes de aprendizaje con cuadernillos digitales interactivos (Notebooks de Jupyter), y el uso de estrategias como la clase invertida y las autoexplicaciones en el aula. Los cuadernillos permiten integrar la mecánica del medio continuo y el pensamiento computacional, y se diseñaron de acuerdo con los lineamientos de la teoría de aprendizaje cognitivo. Los ambientes de aprendizaje combinan elementos del constructivismo y de la teoría de la carga cognitiva. El constructivismo soporta la estrategia de clase invertida que promueve el aprendizaje activo, mientras que la teoría de carga cognitiva sugiere estrategias de andamiaje presentes en los ambientes de aprendizaje.

**Palabras clave:** Pensamiento computacional, Ciencia e ingeniería computacional, Ingeniería Civil, Jupyter Notebook, Python, Método de Elementos Finitos

# Descripción completa de la implementación

## Mecánica Computacional

El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad EAFIT gestiona sus programas de formación mediante una estructura dividida en áreas de conocimiento. Una de las áreas del programa de Ingeniería Civil es Mecánica Computacional (MC) que agrupa las asignaturas Mecánica del Medio Continuo (segundo año), Modelación Computacional (segundo año) e Introducción al Método de los Elementos Finitos (quinto año). El objetivo de MC es promover competencias computacionales que pueden asistir en las áreas que tienen una base mecánica como Vías, Mecánica de Fluidos, y Mecánica de Sólidos. La base física y conceptual del área está representada en el curso Mecánica del Medio Continuo (MMC), mientras que el curso Modelación Computacional (MOD) aporta elementos relativos a la construcción de modelos, visualización de resultados y métodos numéricos. Por su parte, el curso Introducción al Método de los Elementos Finitos (MEF) aporta competencias en simulación para abordar problemas complejos de la mecánica del medio continuo.

## El Problema

La asignatura Mecánica del Medio Continuo introduce nuevos conceptos que requieren niveles de abstracción altos como los conceptos de punto material, deformación unitaria y tensor de tensiones. Estas características hacen que la asignatura constituya un reto de aprendizaje que ha generado índices de mortalidad académica hasta del 70%. Este bajo rendimiento y el carácter transversal del área implica también debilidades en la formación en otras áreas de la carrera. Además, los retos que enfrentan los estudiantes en cursos como Mecánica del Medio Continuo pueden aumentarse cuando se integran elementos de las ciencias computacionales. Experiencias previas han demostrado que los ambientes de aprendizaje integradores del modelado matemático y computacional en contextos disciplinarios pueden generar una sobrecarga cognitiva en los estudiantes (Magana et al., 2013; Vieira et al., 2017). Esta innovación busca mejorar el logro de las competencias en el área de Mecánica Computacional mediante la incorporación de metodologías de aprendizaje de la ingeniería basadas en evidencias. Se espera que la incorporación de métodos y herramientas computacionales permita disminuir los niveles de abstracción inherentes al aprendizaje de

los conceptos físico-matemáticos de ingeniería, integrando actividades de aprendizaje mediante simulación, visualización e interactividad en el aula.

## **La Innovación**

La innovación consiste en el diseño, implementación y despliegue de una transformación curricular que incluye un conjunto de modelos computacionales para elementos finitos a través de cuadernillos digitales interactivos utilizando prácticas pedagógicas basadas en evidencias. Estos se asemejan a las notas de clase tradicionales con la integración de elementos interactivos para visualización, simulación y experimentación numérica en el aula y en tiempo real. El simulador se implementó en Python, es de código abierto y tiene un diseño modular. Esto permite la creación de diferentes ambientes y actividades de aprendizaje de acuerdo con los objetivos y alcances de los diferentes temas y materias. Los ambientes de aprendizaje resultantes permiten combinar la enseñanza de conceptos teóricos propios de la mecánica del medio continuo (u otra disciplina) con herramientas de modelamiento y simulación numérica diseñadas para promover el aprendizaje activo, con el andamiaje necesario para facilitar el aprendizaje, y de fácil distribución a los estudiantes. Estos ambientes de aprendizaje pueden usarse para abordar problemas conceptuales, de modelación o de simulación.

## **Implementación**

Los ambientes de aprendizaje fueron construidos siguiendo la teoría de aprendizaje cognitivo. Esta teoría propone la integración de 4 dimensiones con el fin de asistir a los estudiantes en el aprendizaje de conceptos complejos y en la adquisición de habilidades específicas: contenido, método, secuenciación y sociología. Los cuadernillos interactivos están creados adoptando como filosofía pedagógica la combinación del socio-constructivismo con la teoría de la carga cognitiva (TCC). La TCC sugiere estrategias de andamiaje como el uso de ejemplos y autoexplicaciones para disminuir la sobrecarga cognitiva y facilitar la conexión con la memoria de largo plazo. En este trabajo el socio-constructivismo ha sido incorporado mediante una estrategia de clase invertida que fomenta el aprendizaje activo y colaborativo integrando los cuadernillos digitales interactivos. Paralelamente, la TCC ha sido adoptada en la integración de estrategias de andamiaje como la progresión usa-modifica-crea (Lee et al.,

2011) donde los estudiantes comienzan por explorar activamente algunos ejemplos (usa) a través de autoexplicaciones y predicciones (Sweller et al., 2019). Luego, los estudiantes modifican los ejemplos y, una vez han desarrollado los esquemas necesarios para resolver problemas desde cero, pueden enfrentarse a crear modelos computacionales.

## Ejemplo

Una sesión típica de clase en este contexto tiene la siguiente secuencia de eventos: Primero, el instructor revisa los contenidos teóricos previamente estudiados por los estudiantes mediante notas de clase distribuidas al inicio del curso. Segundo, se abre un espacio de preguntas para aclarar inquietudes de tipo conceptual. La sesión continúa con la discusión (típicamente en equipos de trabajo) de ejemplos autocontenidos y desarrollados en el cuadernillo digital. Los ejemplos combinan aspectos teóricos y computacionales mediante las diferentes funciones de SolidsPy. La sesión concluye con una actividad propuesta que busca involucrar a los estudiantes en la exploración activa de los ejemplos.

## Recursos de la innovación

Los recursos se encuentran disponibles en repositorios de GitHub:

**SolidsPy:** Programa para análisis de tensiones por el método de elementos finitos desarrollado con fines de docencia, de código abierto y escrito en Python. Su estructura modular permite su uso como calculadora de tensiones para el curso de Mecánica del Medio Continuo, librería de métodos numéricos y programación para el curso de Modelación Computacional, y laboratorio de elementos finitos.

**Cuadernillos digitales interactivos (Notebooks de Jupyter):** Documentos digitales interactivos que permiten combinar texto, ecuaciones, imágenes, videos y código. Son el espacio donde se formulan las diferentes actividades de aprendizaje para realizar en el espacio de la reunión. SolidsPy puede importarse como un módulo más y ser usado en el diseño de actividades de aprendizaje.

**Notas de clase:** Cada uno de los cursos dispone de un paquete de notas de clase que presentan los contenidos teóricos en el orden adoptado en cada materia y con referencias a textos disponibles en la literatura. Las notas contienen ejemplos, problemas propuestos y referencias a las actividades formuladas en los cuadernillos digitales.

## Principales resultados e impacto de la iniciativa

Como resultados de esta innovación, los autores han presentado resultados parciales de la misma en conferencias internacionales. Particularmente, en 2019 se participó con una ponencia y un artículo en las memorias de Research in Engineering Education Symposium en Cape Town, Sudáfrica (Vieira & Gomez, 2019). En este año también se participó en el evento Experiencias significativas de aprendizaje en el aula (Guarín-Zapata, 2019), organizado por la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Adicionalmente, debido a la facilidad de uso de SolidsPy este ha sido usado por fuera de la comunidad de Mecánica Computacional (Nie et al., 2020) y también ha motivado otros trabajos en educación en ingeniería civil a nivel internacional (de Los Santos Lara et al, 2019).

Este proyecto fomentó la colaboración entre docentes de diferente formación académica (Ingeniería Civil, Ingeniería de Procesos, Ingeniería de Sistemas, e Ingeniería Física) e investigativa (Mecánica Computacional, Educación en Ingeniería, Educación en Ciencia e Ingeniería Computacional, Ciencia e Ingeniería Computacional). La colaboración entre docentes de diferente formación académica, quienes sirven en diferentes departamentos académicos de EAFIT (Gómez, Guarín-Zapata, Ortega-Alvarez) y en colaboración con un docente del Instituto de Estudios de Educación de la Universidad del Norte (UniNorte) permitió integrar teorías educativas y prácticas de ingeniería para apoyar un proceso de aprendizaje complejo. La innovación, que nace en el área de Mecánica Computacional, será presentada al colectivo de profesores del departamento de ingeniería civil para que sea extendida a otros cursos y eventualmente a otros departamentos.

La alianza interarea e interinstitucional de esta innovación ha promovido además la transferencia de la experiencia a UniNorte. Uno de los miembros del equipo (Vieira) desarrolló un nuevo conjunto de cuadernillos interactivos bajo las mismas prácticas pedagógicas para el curso de Algoritmia y Programación I, curso obligatorio para todas las disciplinas de ingeniería en UniNorte. El profesor Vieira lidera además una comunidad de aprendizaje docente (CAD) en UniNorte con docentes de todas las áreas con el objetivo de integrar la computación en ambientes de aprendizaje disciplinarios. Esta CAD invitó al profesor Gómez de EAFIT

a visitar UniNorte y compartir su innovación y lecciones aprendidas para ser adaptadas a diferentes programas de formación.

En esta misma línea de colaboración interinstitucional, recientemente, los autores Gómez y Ortega-Alvarez fueron invitados a participar en el diseño de estrategias pedagógicas para un curso de riesgo sísmico usando el programa Open Quake de la corporación GEM. En este curso se usarán módulos de computación que pueden ser construidos y compartidos con los estudiantes bajo las mismas premisas de los utilizados en Mecánica del Medio Continuo. El curso será diseñado de manera colaborativa por docentes de Universidades en El Salvador, México, Estados Unidos y Colombia.

Finalmente, una de las razones que motivó esta iniciativa de innovación educativa fue la alta mortalidad académica en la asignatura Mecánica del Medio Continuo, la cual ha alcanzado hasta el 70%. Si bien aún no se cuenta con suficientes datos para realizar una comparación cuantitativa, observaciones cualitativas a la fecha apuntan a una notable mejora en este aspecto. Las futuras ofertas de la asignatura permitirán el registro de datos cuantitativos (p.ej., notas finales) que permitan construir un indicador y hacer seguimiento y comparación del mismo. Por otro lado, una encuesta de percepciones y motivación administrada en 2018 y 2019 permitió observar de manera preliminar que la autoeficacia de los estudiantes matriculados en dos grupos de la asignatura aumentó después del desarrollo de la misma. Estos resultados serán analizados en detalle en un artículo de conferencia cuyo resumen ha sido aceptado para IEEE Frontiers in Education (FIE) 2020 (Ortega-Alvarez et al., 2020).

## **Relevancia del proyecto**

Las evoluciones en los ambientes laborales imponen nuevos retos a la educación en ingeniería. En particular, la computación se ha convertido en una herramienta importante en la industria y la investigación. Tradicionalmente, la computación se ha enseñado de manera aislada en las disciplinas de ingeniería. Es decir, normalmente existe un curso de programación introductorio, pero los estudiantes de ingenierías no tienen la oportunidad de usar la computación en el contexto de sus disciplinas. La Mecánica Computacional es la subdisciplina de la Mecánica Aplicada en la que se combinan el pensamiento computacional y el modelo de la mecánica del medio continuo para formar ingenieros con la capacidad de

abordar problemas complejos a través de la computación. Esta innovación transforma la enseñanza tradicional y brinda una estrategia para la creación de ambientes de aprendizaje interactivos en los que es posible crear modelos y simular fenómenos, consiguiendo disminuir los niveles de abstracción inherentes al modelo del continuo, vinculando al mismo tiempo el pensamiento computacional. Además, los ambientes de aprendizaje resultantes han sido creados para aplicar un modelo de enseñanza a través de estrategias basadas en evidencias como la clase invertida y el uso de autoexplicaciones, en las que se promueve el aprendizaje activo.

## Lecciones aprendidas

Las lecciones aprendidas a lo largo del diseño e implementación de la innovación educativa descrita están relacionadas con el uso de tecnologías en educación y con la práctica de la docencia universitaria y la reflexión sobre la misma. En el primer ámbito, la principal lección aprendida tiene que ver con el desarrollo de los elementos interactivos requeridos para implementar esta innovación. La creación de los cuadernillos interactivos y del código que soporta dicha interactividad requirió una inversión de tiempo considerable, pero este esfuerzo fue doblemente fructífero. Hoy por hoy, no solo los estudiantes se benefician con los ambientes de aprendizaje transformados; adicional a ello, se cuenta con una estrategia modular y replicable en otras disciplinas y otras instituciones. Más aún, la estrategia implementada abre un espacio para la investigación educativa en ingeniería a partir de innovaciones locales.

El diseño pedagógico implementado dio lugar a una lección relacionada con la curva de aprendizaje inherente al despliegue exitoso de la estrategia de clase invertida. Dicha curva tiene dos facetas: Por un lado, los estudiantes deben conocer desde el principio la razón y la finalidad de invertir el aula. Más aún, es importante seguir a lo largo del curso la utilidad percibida por los estudiantes de la estrategia de clase invertida de manera que sea posible realizar oportunamente las intervenciones necesarias. Por otro lado, el instructor mismo experimenta un proceso de aprendizaje y de construcción de confianza sobre la responsabilidad con que los estudiantes asumirán su rol en la clase invertida.

Para terminar, resulta claro de esta experiencia que la innovación educativa conducente al aprendizaje transformador debe ser el resultado

de una acción deliberada, coordinada, e informada por parte de los instructores, en contraposición con la práctica muchas veces empírica de la docencia universitaria. En el presente caso, dicha acción deliberada se enriqueció gracias a la colaboración interdisciplinaria de profesores con diversa formación disciplinar y diferente experiencia en el ámbito de la investigación educativa en ingeniería.

## Sitios web que evidencien el desarrollo de la experiencia y/o proyecto innovador

Como anexo a la postulación, hemos creado un sitio web con información adicional como los diferentes sitios web, un video de ejemplo y las referencias bibliográficas:

[http://nicoguaro.github.io/pages/innovacion\\_educacion\\_2020/](http://nicoguaro.github.io/pages/innovacion_educacion_2020/)

Adicionalmente, los repositorios asociados con esta innovación pedagógica pueden encontrarse siguiendo estos vínculos:

- <https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT>
- <https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/SolidsPy>
- [https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/modelacion\\_computacional](https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/modelacion_computacional)
- [https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/medios\\_continuos](https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/medios_continuos)
- <https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/Introductory-Finite-Elements>

## Referencias bibliográficas

Barba, L. A., Barker, L. J., Blank, D. S., et al. (2019). Teaching and Learning with Jupyter. Disponible en: <https://jupyter4edu.github.io/jupyter-edu-book/index.html>

Guarín-Zapata, N., Gomez, J., Ortega-Alvarez, J. D, & Vieira, C. (2019). Jupyter Notebooks y otros recursos para el aprendizaje activo en el área de Mecánica Computacional de la Universidad EAFIT. Experiencias significativas de aprendizaje en el aula. Universidad Nacional, Medellín.

Lee, I., Martin, F., Denner, J., Coulter, B., Allan, W., Erickson, J., Malyn-Smith, J., & Werner, L. (2011). Computational thinking for youth in practice. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1929887.1929902>

Magana, A. J., Falk, M. L., & Reese, M. J. (2013). Introducing Discipline-Based Computing in Undergraduate Engineering Education. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2534971>

Nie, Z., Jiang, H., & Kara, L. B. (2020). Stress Field Prediction in Cantilevered Structures Using Convolutional Neural Networks. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1115/1.4044097>

Ortega-Alvarez, J., Vieira, C., Guarín-Zapata, N., & Gomez, J. (2020). WIP Flipping a Computational Modeling Class: Strategies to Engage Students and Foster Active Learning. *Frontiers in Education* 2020 (accepted).

Rüde, U., Willcox, K., McInnes, L. C., & Sterck, H. D. (2018). Research and Education in Computational Science and Engineering. *SIAM Review*, 60(3), 707–754. <https://doi.org/10.1137/16M1096840>

Santos Lara, P.J. de los, Granados Alejo, V., & Mota Muñoz, F. G. (2019). Desarrollo de una librería Python para el análisis estructural utilizando elementos finitos. *Memorias Del XXV Congreso Internacional Anual de La SOMIM. Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Sinaloa, México.* [http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A5\\_45.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A5_45.pdf)

Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261–292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>

Vieira, C., Magana, A. J., Falk, M. L., & Garcia, R. E. (2017). Writing In-Code Comments to Self-Explain in Computational Science and Engineering Education. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3058751>

Vieira, C., & Gomez, J. (2019). Integrating Computation into a Civil Engineering Curriculum Instructions at a Colombian Higher Education Institution. *Proceedings of 2019 Research in Engineering Education Symposium (REES), Cape Town.*