



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

DESARROLLANDO PENSAMIENTO COMPUTACIONAL MEDIANTE MÁQUINAS DE GOLDBERG

Juan Guillermo Lalinde Pulido

**Universidad EAFIT
Medellín, Colombia**

Natalia Andrea Bueno Pizarro

**Miembro IEEE
Medellín, Colombia**

Resumen

La educación en ingeniería, para ser exitosa, debe desarrollar las capacidades de deducir, analizar, diseñar e inventar. En los últimos años se ha identificado que una de las herramientas que deben formar parte del arsenal de todo profesional, y en particular todo ingeniero, para resolver problemas complejos es el pensamiento computacional. En el presente trabajo se presenta el uso de la ludificación como estrategia pedagógica para el desarrollo del pensamiento computacional en la formación de ingenieros mediante un concurso de creación de Máquinas de Goldberg.

El Pensamiento Computacional, según Wing, se refiere a “el proceso de pensamiento involucrado en la formulación de problemas y sus soluciones para que las soluciones sean representadas en una forma que pueda ser efectivamente llevada a cabo por un agente de procesamiento de información” y representa una actitud y un conjunto de habilidades universalmente aplicables a todo el mundo, no sólo para los informáticos. Según el modelo de Brennan y Resnik, el desarrollo del pensamiento computacional se da en tres dimensiones: conceptos computacionales, prácticas y perspectivas computacionales.

Ahora bien, las máquinas de Goldberg son dispositivos complejos para resolver problemas simples, y obligan a los estudiantes a utilizar materiales y mecanismos de manera innovadora, abstrayendo las propiedades relevantes para el diseño. La construcción de Máquinas de Goldberg incorpora las tres dimensiones de Brennan y Resnik en un proyecto real que debe ser incorporar material reciclado, debe ser producido y debe funcionar apropiadamente. La actividad se desarrolla en el formato de concurso de manera que, promoviendo la sana competencia, los grupos participantes tengan un incentivo para diseñar e implementar máquinas de Goldberg competitivas que superen las de los demás equipos y les den reconocimiento por la calidad de su trabajo.

Al diseñar Máquinas de Goldberg cada equipo de estudiantes debe concebir una solución confiable, que pueda ser construida y transportada fácilmente, y que desarrolle de manera secuencial una serie de tareas, cada una de las cuales puede tener varios componentes que se desarrollan en paralelo, y que, siguiendo la lógica de este tipo de máquinas, sean cautivadoras para el espectador por ser dispositivos altamente sofisticados que producen un resultado simple.

La estrategia propuesta reúne en una sola actividad la ludificación como estrategia pedagógica para el desarrollo del pensamiento computacional en el marco de un proyecto aplicado con características propias de la ingeniería. Con el concurso de construcción de Máquinas de Goldberg se busca que los estudiantes: (a) desarrollen estrategias y metodologías, basadas en principios científicos y de ingeniería, para resolver problemas; (b) Desarrollen la capacidad de trabajo en equipo para la resolución de problemas; (c) Se sientan motivados para ser creativo y fomenten el espíritu de investigación; (d) Investiguen cómo los ingenieros en el pasado han resuelto este tipo de problemas.

Palabras clave: formación en ingeniería; pensamiento computacional; resolución de problemas; entornos de aprendizaje; máquina Goldberg

Abstract

Engineering education, to be successful, must develop the capabilities to deduce, analyze, design and invent. In recent years it has been identified that one of the tools that should be part of the arsenal of all professionals, and particularly all engineers, to solve complex problems is computational thinking. In the present work, the use of gamification as a pedagogical strategy for the development of computational thinking in the training of engineers through a Rube Goldberg Machine creation contest is presented.

Computational Thinking, according to Wing, refers to "the thought process involved in the formulation of problems and their solutions so that the solutions are represented in a form that can be effectively carried out by an information processing agent" and represents an attitude and a set of skills that are universally applicable to everyone, not just to computer scientists. According to the model of Brennan and Resnik, the development of computational thinking occurs in three dimensions: computational concepts, practices and computational perspectives.

Now, Rube Goldberg machines are complex devices to solve simple problems, and force students to use materials and mechanisms in an innovative way, abstracting the properties relevant to the design. The construction of Rube Goldberg Machines incorporates the three dimensions of Brennan and Resnik into a real project that must be incorporate recycled material, must be produced and must function properly. This activity is developed in the contest format so that, promoting healthy competition, participating groups have an incentive to design and implement competitive Goldberg machines that surpass those of other teams and give them recognition for the quality of their work.

When designing Rube Goldberg Machines, each team of students must devise a reliable solution that can be easily constructed and transported, and that develops sequentially a series of tasks,

each of which can have several components that are developed in parallel, and that, following the logic of this type of machines, are captivating for the spectator because they are highly sophisticated devices that produce a simple result.

The proposed strategy brings together in a single activity the gamification as a pedagogical strategy for the development of computational thinking in the framework of an applied project with characteristics of engineering. With the construction of Goldberg Machines, students are expected to: (a) develop strategies and methodologies, based on scientific and engineering principles, to solve problems; (b) Develop the ability to work as a team to solve problems; (c) Be motivated to be creative and foster the spirit of investigation; (d) Investigate how engineers in the past have solved these types of problems.

Keywords: *engineering education; computational thinking; problem resolution; learning environments; Goldberg machine*

1. Introducción

Los futuros ingenieros enfrentarán enormes desafíos. La sociedad y la tecnología están evolucionando a un ritmo acelerado y los estudiantes de ingeniería deben estar preparados para un mundo en constante cambio. La Academia Nacional de Ingeniería de los Estados Unidos declaró que, si la profesión de ingeniería va a tomar la iniciativa para definir su propio futuro, debe abordar varios puntos, siendo uno de ellos la necesidad de transformar la educación en ingeniería [1]. De hecho, un año después, en 2004, publicaron un informe sobre ese tema [2].

Pero esta reflexión va más allá. La tecnología está transformando a la sociedad y necesitamos repensar las habilidades básicas que cada ciudadano debe desarrollar. Esto ha llevado a repensar la educación básica al incluir STEM y el pensamiento computacional. Como consecuencia natural de estas reflexiones, estamos experimentando con nuevos enfoques para desarrollar el pensamiento computacional, y más específicamente el pensamiento algorítmico, en los cursos de ingeniería de primer año. En otras palabras, estamos utilizando un enfoque de ingeniería para la mejora continua en la educación en ingeniería como se indica en [3].

Este documento está organizado de la siguiente manera: una primera sección en donde se presenta pensamiento computacional y las máquinas de Goldberg. En una segunda sección se presenta la estrategia pedagógica llevada a cabo, los desafíos y cambios realizados. Y finalmente, las conclusiones y trabajos futuros.

2. Marco teórico

2.1. Pensamiento computacional.

El Pensamiento Computacional involucra resolver problemas, diseñar sistemas y entender el comportamiento humano, tomando conceptos de las ciencias de la computación [4], el cual, a

diferencia del pensamiento ingenieril, que trabaja con el mundo físico y sus limitaciones, además de trabajar con él lo puede hacer con mundos virtuales.

Según el *Center for Computational Thinking* [5], el pensamiento computacional se caracteriza por ser una habilidad fundamental o forma de pensar humana con alta capacidad de conceptualización y generación de ideas, no memorística o de programación, que combina y complementa el pensamiento matemático e ingenieril, sin por ello ser similar al procesamiento de datos realizado por una computadora. Este pensamiento puede ser adquirido y desarrollado por toda persona que se lo proponga para ser usado en todo momento.

Los pilares fundamentales del Pensamiento Computacional definidos por Wing [4] son:

- Descomponer, o sea dividir un problema o sistema que se desea entender, comprender e intervenir, en partes más pequeñas, más manejables, de acuerdo con un propósito determinado. Esta descomposición no pierde de vista la forma como las diferentes partes interactúan entre sí.
- Reconocer patrones, lo que significa identificar similitudes y diferencias entre y dentro de una gama de problemas.
- Abstractar, en el sentido de enfocar la atención sólo en la información importante o altamente incidente, ignorando los detalles irrelevantes, con el fin de evitar distractores frente al propósito esencial. No se resuelven problemas sino familias de problemas.
- Formular algoritmos, con el fin hallar y desarrollar soluciones genéricas. El algoritmo es una colección finita de pasos no ambiguos, que en un tiempo finito producen un resultado.

El mundo actual es complejo y globalizado, y los jóvenes deben adquirir nuevos conocimientos y habilidades permanentemente a lo largo de la vida. Para esto, los estudiantes deben construir y desarrollar un pensamiento algorítmico, lógico y científico que les permita encontrar soluciones a problemas actuales y futuros de forma eficiente. Cuando estas soluciones son creativas e innovadoras podremos afirmar que los futuros ingenieros están desarrollando un Pensamiento Computacional.

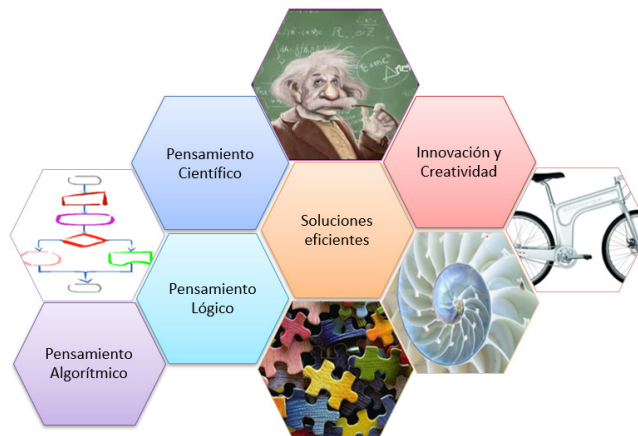


Fig 1. Descripción gráfica de Pensamiento Computacional. Construcción propia.

2.2. Máquinas de Goldberg.

Rube Goldberg fue un caricaturista reconocido por crear dibujos animados que representan dispositivos complicados que realizan tareas sencillas. La figura 1 muestra una de sus caricaturas. Representa un dispositivo complejo que se activa cuando el Profesor Butts levanta la cuchara de sopa y el propósito del dispositivo es limpiar su barbilla permitiendo que el péndulo con la servilleta adjunta se balancee hacia adelante y hacia atrás.

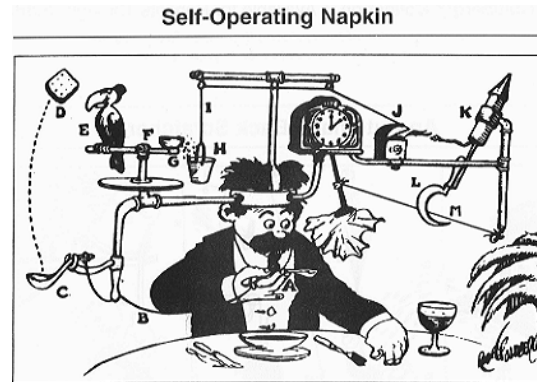


Fig. 2. El profesor Butts y la servilleta autooperatoria de Rube Goldberg - Publicado originalmente en Collier's, 26 de septiembre de 1931, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9886955>

Su trabajo fue tan único y distintivo que el diccionario Merriam-Webster incluyó a Rube Goldberg como un adjetivo que significa lograr por medios complejos lo que aparentemente se podría hacer de forma simple. (accomplishing by complex means what seemingly could be done simply) [6]. Es importante tener en cuenta que Rube Goldberg se graduó de ingeniero en la Universidad de California en Berkeley, por lo que sus dibujos animados sobre invenciones tenían raíces técnicas.

Las máquinas Goldberg se han utilizado para el entretenimiento. Los videojuegos como *The Incredible Machine* [7], desafían al usuario a construir una máquina de Goldberg para resolver problemas simples en un entorno realista que simula el mundo físico. También hay una organización llamada *Inc Rube Goldberg* dedicada a promover la invención realizando competiciones anuales para la construcción de máquinas de Goldberg.

En este trabajo, se utilizan máquinas de Goldberg con una intención pedagógica. Se ven como una forma divertida de aplicar el pensamiento computacional para realizar una tarea simple. Se argumenta que el pensamiento abstracto y la noción de una secuencia de operaciones son necesarios para construir una máquina de Goldberg exitosa. Al definir las restricciones que deben obedecer en la construcción de la máquina y al agregar una evaluación clara del proceso, se utiliza esta actividad como una estrategia pedagógica.

3. Estrategia Pedagógica

Las máquinas de Goldberg se han utilizado en cursos de ingeniería de primer año. Por ejemplo, Lei Chi-Un plantea, en Teaching introductory electrical engineering [10], la construcción de

máquinas Rude Goldberg como una forma de introducir principios de diseño de máquinas mediante el aprendizaje basado en proyectos. Un enfoque similar presenta C. U. Lei [8], donde los estudiantes construyen una máquina de Goldberg con actuadores eléctricos.

En este trabajo el enfoque es diferente. Los estudiantes construyen una máquina de Goldberg no para aprender el diseño sino para materializar un algoritmo que realiza una tarea específica. La ejecución de la máquina implica secuencias y sincronización, entre otros componentes básicos de algoritmos. Este enfoque tiene sentido porque una característica del pensamiento computacional es que está conceptualizando y no programando. Requiere pensar en múltiples niveles de abstracción [11]. Las máquinas de Goldberg, al ser dispositivos complejos para resolver problemas simples, los obligan a usar materiales y mecanismos de manera innovadora, abstrayendo las propiedades relevantes para el diseño.

El curso de pensamiento algorítmico busca proporcionar experiencias para que los estudiantes adquieran una estructura mental que les permita abordar los problemas de ingeniería de manera organizada y poder crear propuestas de soluciones desde un punto de vista algorítmico.

Al implementar esta estrategia de las máquinas de Goldberg, se espera que los estudiantes de ingeniería:

- Desarrollen estrategias y metodologías, basadas en principios de ciencia e ingeniería, para resolver problemas.
- Desarrollen las capacidades para el trabajo en equipo y la resolución de problemas.
- Se sientan motivados para ser creativos y fomentar el espíritu de investigación.
- Aprendan a utilizar referencias bibliográficas.
- Aprendan cómo los ingenieros en el pasado han resuelto este tipo de problemas.
- Aprendan a presentar un informe de forma adecuada.

Las figuras 3 y 4 presentan dos máquinas diseñadas por los estudiantes. En el siguiente enlace se presenta videos de algunas máquinas en funcionamiento <https://www.dropbox.com/sh/7ownmlrh2h7np7o/AACJgikM2aNK2hTf8J2wbC6Ka?dl=0>

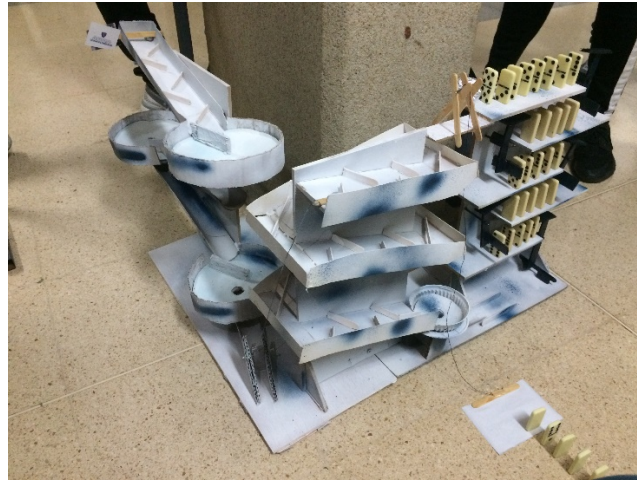


Fig 3. Máquina de Goldberg diseñada por un grupo de estudiantes.

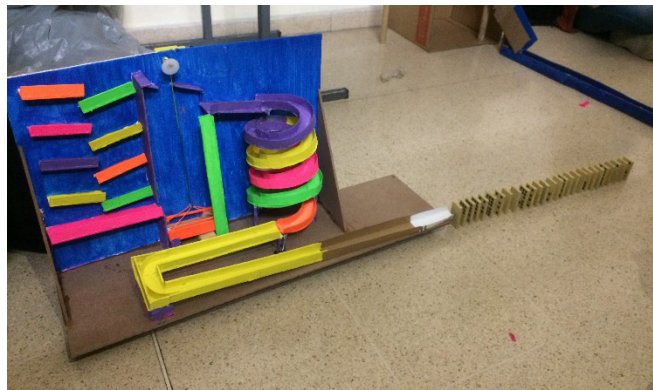


Fig 4. Máquina de Goldberg diseñada por un grupo de estudiantes.

Para diseñar la máquina de Goldberg, los estudiantes deben tener presente algunas restricciones. El desafío de diseñar la máquina tiene entonces otro nivel de dificultad porque las restricciones deben ser cumplidas y verse reflejadas en el producto final. Las restricciones son:

- Al menos el 30% de los materiales utilizados para construir la máquina deben ser materiales reciclados.
- La máquina debe ser diseñada y construida por todos los miembros del equipo.
- El mecanismo de activación para iniciar la máquina será una esfera de 1,5 cm de diámetro, que se pondrá al comienzo de la máquina y se soltará. El impulso inicial solo puede ser debido a la gravedad, no puede impulsada.
- El funcionamiento de la máquina debe ser completamente autónomo; la única intervención humana permitida es soltar la esfera que activa la máquina.
- El tiempo de ejecución de la máquina debe ser de al menos 20 segundos. La hora de inicio del cronómetro será en el momento que se suelta la esfera.
- La máquina debe emplear al menos 4 mecanismos diferentes basados en la transferencia de energía.

- La máquina no puede usar fuego, pólvora o cualquier otro elemento o material que pueda poner en peligro la integridad física de los miembros del equipo o del público.

Los estudiantes diseñan la máquina de Goldberg durante el curso y la exhiben en la última semana del semestre. Los estudiantes deben presentar no solo la máquina en funcionamiento, sino también un breve video que presenta: (a) la descripción detallada de la máquina, (b) qué materiales se utilizaron, (c) el diseño y la metodología de construcción, (d) cómo se organizaron el equipo para desarrollar el proyecto, (e) los roles desempeñados por cada miembro, (f) las decisiones estratégicas que tomaron y su explicación, y (h) qué desafíos o dificultades se les presentaron en la elaboración del proyecto.

Todos los estudiantes, al momento de presentar sus máquinas en funcionamiento, compiten entre sí por los primeros lugares. La competencia cuenta con un jurado conformado por profesores que han acompañado el curso durante el semestre y siguiendo la rúbrica presentada en la tabla 1.

Nombre Equipo	Integrante 1								
	Integrante 2								
	Integrante 3								
Inicia con esfera 1.5 cm	Si	Eliminado						Subtotal	
Fuego	Si	Eliminado							
Mecanismo paralelo	Si	+10		No					
Material reciclado	<30%	0	>30%	20	>50%	+10			
Tiempo	0-15 seg	0	15 -20 seg	10	20 – 25 seg	20	>25	+5	
# mecanismos	1-3	0	4-5	20	>6	+5			
Funcionamiento autónomo	Si	20	No	-10					
Funciona	1 ^{er} intento	20	2 intento	15	3 intento	10	4 intento	0	
Total									

Tabla 1. Rúbrica para la competencia de máquinas de Goldberg.

La siguiente es la descripción de los elementos de la rúbrica:

- Nombre del equipo y sus integrantes.** Los estudiantes deben ingeniarse un nombre para el equipo que al mismo tiempo describa la máquina a presentar.
- Esfera de 1.5 cm.** Si los estudiantes no cumplen con este requisito inicial, serán eliminados de la competencia.
- Fuego.** Si uno o varios mecanismos de la máquina utilizan fuego, pólvora o cualquier otro elemento o material que pueda poner en peligro la integridad física de los miembros del equipo o del público, serán eliminados de la competencia.
- Mecanismo paralelo.** Si en la maquina existen dos o más mecanismos en paralelo que sean activados con la esfera inicial, el equipo obtiene 10 puntos adicionales.

- **Material reciclado.** La máquina debe estar compuesta mínimo en 30% con material reciclado. A medida que el porcentaje es mayor, el equipo obtiene puntos adicionales. Por ejemplo: una caja de cartón es material reciclado, cartón paja no es material reciclado.
- **Tiempo.** El tiempo mínimo de duración de todos los mecanismos de la máquina desde que se suelta la esfera debe ser entre 15 y 20 segundos. Si la duración es menor, el equipo no obtiene puntos. Si el tiempo es mayor, el equipo obtiene puntos adicionales.
- **Número de mecanismos.** La máquina debe tener como mínimo 4 mecanismos. Si tiene menos, el equipo no obtiene puntos. Si tiene más de 4 mecanismos, el equipo obtiene puntos adicionales.
- **Funcionamiento autónomo.** La máquina debe funcionar de forma autónoma, sin intervención humana. Si no cumple con esta condición, se restan 10 puntos al equipo.
- **Funciona.** En la competencia se le dan 3 oportunidades al equipo para presentar su máquina funcionando completamente. A medida que realizan sus intentos, serán menos puntos obtenidos.
- **Total.** El puntaje total del equipo.

Finalmente, se les hace un reconocimiento a los tres equipos con mejor puntaje.

4. Conclusiones y trabajos futuros

La estrategia pedagógica del diseño y construcción de las máquinas de Goldberg se trabajó durante 6 semestres consecutivos con estudiantes de primer semestre con excelentes resultados. La retroalimentación proporcionada por los estudiantes indica que el enfoque es exitoso, siendo uno de los comentarios más recurrentes que sienten que incentiva la creatividad. El impacto de la estrategia se analizó con profesores de semestres posteriores. Estos reportan mejoras significativas en:

- a) Conceptos básicos adquiridos: principios físicos como gravedad, velocidad, movimiento circular, movimientos pendulares, inercia y transferencia de energía.
- b) Trabajo en equipo y planeación: construcción de documentación inicial en equipo, procesos de concertación, división de trabajo por etapas, asignación y cumplimiento de tareas y decisiones estratégicas.
- c) Desarrollo personal: conocimiento de las habilidades de sus compañeros, superar las dificultades presentadas y manejo del tiempo.

Finalmente, los videos donde los estudiantes describen su percepción de toda la actividad han demostrado que aprender el pensamiento computacional y algorítmico puede ser divertido. Ahora el reto es diseñar un curso no solo para ingenieros.

5. Referencias

[1] Committee on The Engineer of 2020 Phase I. The engineer of 2020. 2004.

- [2] Adapting Engineering Education, New Century Committee, Phase Ii, Engineering Education, National Academy, Engineering Isbn, This Pdf, National Academies Press, National Academies Press, National Academy, National Academy, and National Academies Press. Educating the Engineer of 2020. 2005.
- [3] Claudia Zea, Alejandra Magana, Alberto Rodriguez, Juan G. Lalinde- Pulido, and Natalia A. Bueno. An engineering approach for continuous improvement in engineering education. In ASEE International Forum, 2013.
- [4] Wing, J. M. (2006). Computational thinking. Communications of the ACM, 49(3), 33. doi:10.1145/1118178.1118215.
- [5] CMU Center for Computational Thinking – Cuny, Snyder, Wing – <http://www.cs.cmu.edu/~CompThink/>
- [6] Merriam-Webster. Rube Goldberg – Definition of Rube Goldberg by Merriam-Webster.
- [7] The Incredible Machine: Sierra On-Line, Inc: Free Streaming: Internet Archive.
- [8] C U Lei, H Kwok-Hay So, E Y Lam, K K Y Wong, R Y K Kwok, and C K Y Chan. Teaching introductory electrical engineering: Project-based learning experience. In 1st IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering, TALE 2012, pages H1B1–H1B5, 2012.
- [9] Jeannette M. Wing and Jeannette M. Computational thinking. Communications of the ACM, 49(3):33, 3 2006.
- [10] Author Lei, Chi-Un Lei, Hayden Kwok-Hay So, Edmund Y Lam, Kenneth Kin-Yip Wong, Ricky Yu-Kwong Kwok, and Cecilia K Y Chan. Title Teaching introductory electrical engineering: project-based learning experience Session H1B Teaching Introductory Electrical Engineering: Project-Based Learning Experience. pages 20–23, 2012.
- [11] Inc Rube Goldberg. About Rube Goldberg, 2017.
- [12] Peter J. Denning and Peter J. Is computer science science? Communications of the ACM, 48(4):27, 4 2005.
- [13] Peter J. Denning and Peter J. The science in computer science. Communications of the ACM, 56(5):35, 5 2013.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)