

Valoración de estrategia para el afianzamiento del aprendizaje de Coriolis tridimensional en estudiantes de la asignatura de dinámica

Gabriela Betancur Montoya^a, Leidy Tatiana Marín Urrego^b, Laura Carolina Álvarez Gil^c, Alejandro Restrepo Martínez^d

^{a,b} Facultad de Minas y ^{c,d} Grupo GPIMA, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.
gbetancurm@unal.edu.co, tmlarinu@unal.edu.co, lcalvarezg@unal.edu.co, arestre5@unal.edu.co

Resumen— Normalmente, la aceleración en coriolis tridimensional es uno de los temas que genera más retos para los estudiantes Ingeniería Mecánica. Este artículo plantea una estrategia que permite mejorar el proceso de aprendizaje de Coriolis 3D. La estrategia cuenta con los siguientes pasos: En la primera etapa se realiza un aporte conceptual que facilita entendimiento del ejercicio planteado; en el segundo paso desarrolla matemáticamente el ejercicio propuesto, para lo cual se usa de la derivada de un vector con respecto al tiempo, medido en relación en un sistema trasladante-rotatorio; en el tercer paso se programa y analiza el ejercicio, como resultado se presenta la incidencia de la velocidad angular en la aceleración de coriolis, la cual afecta la magnitud total de la aceleración. El cuarto paso realiza una encuesta que mide la percepción del estudiante y cuestionarios de valoración del desempeño real, los cuales fueron aplicados a dos grupos de estudiantes de la asignatura de Dinámica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. En el estudio se dividieron los grupos así: un conjunto de estudiantes con acceso a material complementario y grupo de control. Se evidenció que quienes leyeron el artículo tuvieron un mejor desempeño. Finalmente, la encuesta y su revisión permitió hacer cambios en la clase presencial lo cual ayudó en la presentación y el entendimiento de los conceptos asociados al problema trabajado.

Palabras Clave— Coriolis, dinámica, aprendizaje, Ingeniería Mecánica.

Recibido: 27 de abril de 2020. Revisado: 27 de mayo de 2020. Aceptado: 30 de julio de 2020.

Assessment of strategy to strengthen the learning of three-dimensional Coriolis in students of the subject of Dynamics

Abstract— Normally, three-dimensional Coriolis acceleration is one of the subjects that challenges mechanical engineering students. This article presents a strategy that improves the learning process of Coriolis 3D. The strategy has the following steps: In the first step, a conceptual contribution is made that facilitates understanding of the problem posed; the second step mathematically develops the proposed exercise, for which the derivative of a vector is used with respect to the time measured in relation to a translatory-rotary system; in the third step the exercise is programmed and analyzed, as a result the incidence of the angular velocity in the Coriolis acceleration is presented, which affects the total magnitude of the acceleration. The fourth step carries out a valuation survey, which was applied to two groups of students in the subject of Dynamics at the National University of Colombia, Medellín campus. In the study, the groups were divided as follows: a group of students who read the article and another set with students who do not read it. It was evident that those who read the article had a better performance. Finally, the survey and its revision allowed changes to be made in the classroom which helped in the presentation and understanding of the concepts associated with the problem worked on.

Keywords— coriolis, programming, learning, survey, valuation.

1 Introducción

Para el proceso de aprendizaje en el contexto de la Ingeniería Mecánica es necesario crear nuevas alternativas y espacios en que los estudiantes puedan afianzar los conocimientos; además, de fortalecer diferentes aspectos que retomen aprendizajes anteriores, como lo son los contenidos de asignaturas de: estática, fundamentos de programación, algebra lineal, geometría vectorial y física mecánica. Además de lo anterior, la integración de la fundamentación básica con la generación de pensamiento crítico y el desarrollo de capacidades de síntesis, análisis e interpretación, son un reto que implica una nueva postura que permita desarrollar nuevas herramientas.

A nivel internacional, se encuentran diversas aproximaciones que buscan lograr que los estudiantes ingeniería interioricen los conceptos de la Dinámica en contexto de los mecanismos de barras. Para esto, en algunos casos, se apela a un trabajo activo por parte de los estudiantes, lo cual se logra abriendo un espacio para que ellos interactúen con los mecanismos en estudio. Ejemplos en este sentido se encuentran en los siguientes artículos: Dankowicz, en 2006, presenta una propuesta de aprendizaje basada en proyectos, en la cual se modela la dinámica de cuerpos rígidos multi-cuerpos, lo que permitió a los estudiantes integrar conceptos de alto nivel relacionados al algebra lineal y las ecuaciones diferenciales y desarrollar habilidades en representación CAD de las piezas [1]. Akasheh en 2013, desarrolla una estrategia que permite enseñar la dinámica de mecanismos incorporando procesos de experimentación, reflexión, análisis y planeación por parte de los estudiantes. En esta propuesta los estudiantes evalúan la validez gráfica, física y matemática de mecanismos planos de cuatro barras y se valora su opinión a través de una encuesta [2].

En el contexto iberoamericano, se encuentra trabajos que reportan experiencias relacionado con temas de Dinámica. Es así como un ejemplo de esto es el artículo de Domenech y Casal, publicado en 2018 en el que se desarrolla una metodología activa que implementa una estrategia didáctica para enseñar cinemática y cinética a estudiantes de colegio a

través de trabajar conceptos y procedimientos científicos para resolver casos, en el contexto del peritaje de accidentes de tráfico. Se destaca, que el trabajo evalúa los resultados de los exámenes de los estudiantes, además, de presentar hallazgos de una encuesta en donde los estudiantes ponderan los conceptos aprendidos, valoran la utilidad de las herramientas didácticas trabajadas y establecen apreciaciones sobre el trabajo de los peritos en el contexto de los juicios [3].

En el contexto latinoamericano también se observa interés en el elaborar e implementar herramientas didácticas que apoyen los cursos de Física Mecánicas y Dinámica en los programas de ingeniería. Algunos ejemplos son: El trabajo de Gallardo, el cual aborda la explicación de un caso de aceleración de Coriolis en un mecanismo plano. El objetivo del artículo se enmarca en la representación vectorial de la cinemática como una herramienta para complementar las explicaciones presentadas en los libros guía de la asignatura de Dinámica, trabajando como caso de estudio un mecanismo de Ginebra; sin embargo, a pesar de la relevancia del tema el documento, no se valora el uso del material presentado con los estudiantes de una asignatura [4]. Enrique en 2012, presenta la instrumentación de una volante de inercial que permite hacer un estudio de la cinemática de ésta reportando mediciones de desplazamiento, velocidad y aceleración. Además, el documento plantea una experiencia de laboratorio analizando los diferentes resultados experimentales y planteando una serie de interrogantes para que los estudiantes exploren las temáticas del momento de inercia, cinemática de la volante, análisis de energía y desarrollen habilidades de carácter investigativo [5]. Finalmente, otro ejemplo en el contexto de latinoamericano es una propuesta de aprendizaje significativo de la cinemática presentada por Sánchez et al. , en 2009 a través de la resolución de problemas, en donde especifica una metodología que ayuda a facilitar y promover la adquisición de conocimientos de dicho tema, profundizando en los conceptos, procedimientos, actitudes, principios y leyes que rigen la cinemática, realizándolo a través de un problema integrador que establece las ecuaciones disponibles, las variables conocidas y las desconocidas con el objetivo de establecer un método que permita identificar las relaciones entre ellas para resolver la cinemática y cinética de los ejemplos abordados [6].

Por otro lado, a nivel nacional, se encuentra el método “solución de problemas por objetivos” para la enseñanza de mecánica vectorial en ingeniería [7], con el que se pretende ayudar a los estudiantes en mejorar la capacidad para afrontar los problemas, haciendo uso de un ejercicio específicamente del área de dinámica, el cual permite profundizar conceptos y realizar un análisis detallado de orden lógico.

A nivel local, también se han realizado otros desarrollos en este campo, así que, en el documento de Trujillo et al., publicado en 2010 se aborda una estrategia didáctica de aprendizaje activo para un curso Dinámica del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia. Los pasos que ejecutan son: orientación del nuevo contenido, asimilación del contenido, dominio del contenido, sistematización del nuevo contenido, evaluación del aprendizaje y autoevaluación. Para ejecutar estos puntos

desarrolla la planeación de clase en la que aplica una encuesta de prejuicios, plantea un taller temático, enuncia un ejercicio de un texto guía para que los estudiantes lo desarrollen y finalmente termina con una encuesta de autoevaluación. Al revisar los resultados obtenidos los autores concluyen que es una estrategia válida para cursos básico de ingeniería ya que genera en el estudiante un rol activo [8].

Algunos ejemplos adicionales son varios trabajos adelantados en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en donde en las asignaturas de Dinámica y Mecánica de Sólidos, uno de ellos es el estudio de la dinámica del vuelo de un *frisbee*, el cual ayuda a entender cómo se desarrolla la cinemática y como se describe la trayectoria a partir de otros dispositivos como el Arduino® o el programa Kinovea® [9]. Otro trabajo destacado es la aplicación de la fotoelasticidad como herramienta en la enseñanza de la mecánica de sólidos realizando un análisis experimental que permite afianzar los conocimientos en el tema de esfuerzos [10]. También se encuentra un trabajo similar que aporta a los estudios de la mecánica de sólidos y a la dinámica estructural con el estudio de los esfuerzos a través de fotoelasticidad para analizar discos que rotan [11]. Por último, se enuncia un trabajo que plantea la estrategia evaluar los conocimientos de Coriolis en un caso de movimiento plano, pero que no cuenta con un instrumento tipo encuesta para evaluar el desempeño de la propuesta [12].

Así, en esa línea de investigación, se desarrolló un artículo el cual propone una metodología que permita a los estudiantes mejorar el aprendizaje del tema de Coriolis en tres dimensiones [13]. El presente artículo aborda el tema de Coriolis tridimensional, como complemento al trabajo ya desarrollado [13], dado que es uno de los temas mayor dificultad en el aprendizaje de la asignatura de Dinámica y se presenta como la continuación de la propuesta metodológica, valorando los resultados obtenidos al aplicar la estrategia. Se parte de un ejercicio presentado por el texto guía, el cual se aborda de forma vectorial y se generan una serie procesos activos por parte del estudiante con relación a la programación computacional del ejercicio y al análisis e interpretación de los resultados. Finalmente, como estrategia de valoración se realizaron encuestas que miden la apreciación de los estudiantes frente al material propuesto y cuestionarios que determinan el desempeño, lo cual fue contrastado con su desempeño general en actividades evaluativas de la asignatura Dinámica.

2 Métodos y procedimientos

Para abordar el desarrollo del ejercicio propuesto en el texto guía, se presentan cuatro etapas, con las cuales se pretende afianzar los conocimientos adquiridos en la asignatura de Dinámica, profundizando en diversos aspectos del ejercicio con el objetivo de fortalecer el proceso de resolución y esperando lograr un mejor entendimiento por parte de los estudiantes. Las etapas planteadas son:

- Conceptualización. Se espera que el estudiante a partir de la comprensión del ejercicio pueda plantear y definir conceptos necesarios para llegar a una correcta solución.

- Procedimiento: En esta etapa, el estudiante debe estar en la capacidad de desarrollar matemáticamente el ejercicio, planteando todas las ecuaciones necesarias para hallar la solución en el caso en que plantea el ejercicio.
- Interpretación: En esta categoría se procede a desarrollar un algoritmo y programar un código a partir de las ecuaciones planteadas en la etapa de procedimiento.
- Abstracción: En este último elemento, se grafican los resultados obtenidos de la programación ejecutada en Matlab® y analizando las diferentes situaciones que se pueden presentar en el ejercicio.

A continuación, se muestra la Figura 1 con las categorías de aprendizaje asociadas a las etapas especificadas. En esta se establece que las etapas tienen una jerarquía que va desde el nivel bajo al nivel alto. Se espera que al usar las herramientas propuestas los estudiantes mejoren en cada una de las categorías planteadas, lo cual se evalúa con una encuesta.

Categorías del aprendizaje

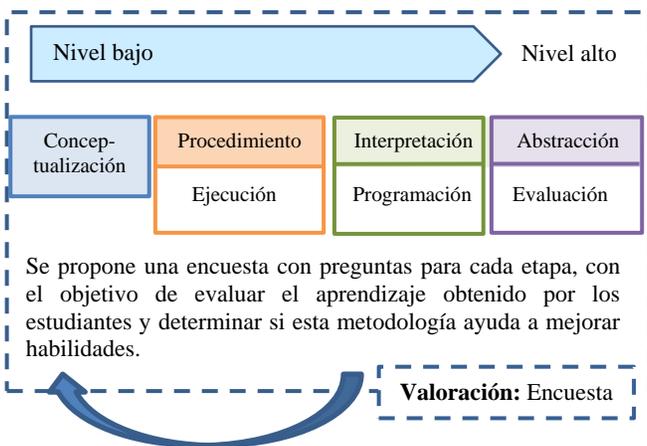


Figura 1: Categorías del proceso aprendizaje al abordar un ejercicio. Fuente: Los autores.

3 Resultados

Los resultados obtenidos se evidencian en varias etapas: la conceptualización, el planteamiento procedimental, la programación e interpretación y el análisis de resultados. La elaboración de encuestas y cuestionarios se desarrollan de acuerdo con lo establecido en el trabajo previo [13], mientras que, las etapas siguientes de análisis de los resultados de encuestas y cuestionarios se abordan este documento, con el fin de realizar una propuesta para mejorar la valoración del proceso.

3.1 Conceptualización

El ejercicio propuesto en el libro de Hibbeler [14], consiste en determinar la velocidad y la aceleración en el collar C cuando está ubicado en posición vertical a 300mm del punto A, teniendo en cuenta que hay un motor que gira sobre el eje z con una velocidad angular $\omega=3 \text{ rad/s}$ y una barra acoplada al eje del motor que gira con la velocidad angular $\omega = 6 \text{ rad/s}$

como se muestra en la figura 2. Además, se conocen la velocidad y la aceleración lineales con la que se desliza el collar, 6 m/s y 3 m/s^2 respectivamente, como se muestra en la figura 2.

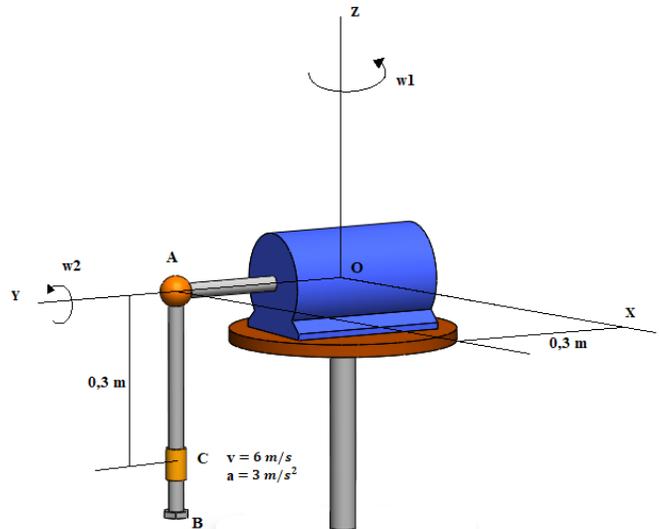


Figura 2: Diagrama especificaciones del ejercicio Fuente: Artículo [13]

La solución se realizó de forma matricial tomando en cuenta los valores de los datos dados en el ejercicio. Para resolver el ejercicio, es necesario tener claro los siguientes conceptos, uno de ellos se muestra en la Figura 3. Estos son fundamentales para el desarrollo.

Conceptualización

Derivada del vector respecto al sistema coordenado que se traslada y rota (xyz) más el producto cruz de la velocidad de angular del sistema coordenado (xyz) respecto al a sistema inercial (XYZ) por el vector.

$$\dot{A} = (\dot{A})_{xyz} + \Omega \times A$$

Figura 3: Derivada con respecto al tiempo de un vector medido con respecto a un sistema fijo, cuando el vector está en un sistema trasladante-rotatorio. Fuente: Tomado del libro de Hibbeler [14]

La aceleración de Coriolis es el producto cruz entre la rotación del sistema trasladante y rotante (xyz) por la velocidad línea en el sistema xyz como lo presenta la siguiente ecuación.

$$2\Omega \times (v_{C/A})_{xyz}$$

3.2 Solución del ejercicio

Para llegar a la solución deseada se realiza una serie de pasos que se especifican a continuación. Primero se desarrolla el diagrama de referencia y posicionamiento a partir de los datos suministrados en el ejercicio, como se muestra en la Figura 4. En esta se ubica un sistema inercial XYZ, un sistema rotacional xyz y un sistema rotacional relativo x'y'z' los cuales rotan alrededor del inercial. Además, se ubican los vectores posición y las direcciones de las velocidades y aceleraciones.

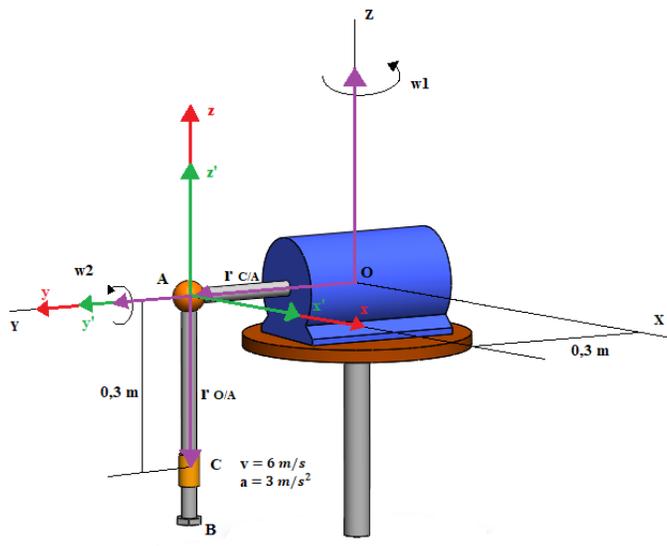


Figura 4: Diagrama de los sistemas de referencia y posicionamiento. Fuente: Artículo [13]

Posteriormente se definen las condiciones dadas por el ejercicio, así:

$$\Omega = \omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix} \text{ rad/s} \quad \dot{\Omega} = \dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Omega' = \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ rad/s} \quad \dot{\Omega}' = \dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Se define el sistema inercial XYZ y el sistema rotacional xyz.

Se realiza el análisis del movimiento en A

$$\mathbf{v}_A = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r}_{OA}$$

$$\mathbf{a}_A = \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \mathbf{r}_{OA} + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r}_{OA})$$

Se define un segundo sistema rotacional relativo x'y'z' y se halla velocidad y aceleración del vector $\mathbf{r}_{C/A}$ usando la derivada con respecto al tiempo de un vector medido con respecto a un sistema fijo, cuando el vector está en un sistema trasladante-rotatorio.

$$(\mathbf{v}_{C/A})_{xyz} = (\dot{\mathbf{r}}_{C/A})_{xyz} = [(\dot{\mathbf{r}}_{C/A})_{x'y'z'} + \boldsymbol{\omega}_2 \times (\mathbf{r}_{C/A})_{xyz}]$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{a}_{C/A})_{xyz} &= (\ddot{\mathbf{r}}_{C/A})_{xyz} \\ &= [(\ddot{\mathbf{r}}_{C/A})_{x'y'z'} + \boldsymbol{\omega}_2 \times (\dot{\mathbf{r}}_{C/A})_{x'y'z'}] \\ &\quad + \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times (\mathbf{r}_{C/A})_{xyz} + \boldsymbol{\omega}_2 \times (\dot{\mathbf{r}}_{C/A})_{xyz} \end{aligned}$$

El siguiente paso es hallar la velocidad y aceleración en el collar

$$\mathbf{v}_C = \mathbf{v}_A + (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{C/A}) + (\mathbf{v}_{C/A})_{xyz} = \begin{bmatrix} -2,7 \\ 0 \\ -6 \end{bmatrix} \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_C &= \mathbf{a}_A + (\dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_{C/A}) + (\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{C/A})) + \\ &\quad (2\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{v}_{C/A})_{xyz}) + (\mathbf{a}_{C/A})_{xyz} \\ \mathbf{a}_C &= \begin{bmatrix} -72 \\ -13,5 \\ 7,8 \end{bmatrix} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Finalmente, se calcula la aceleración de Coriolis y se halla el porcentaje de la anterior respecto a la aceleración total del collar.

$$\mathbf{a}_{Cor} = 2\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{v}_{C/A})_{xyz} = \begin{bmatrix} 0 \\ -10,8 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m/s}^2$$

Magnitud de $\mathbf{a}_C = 73,7$

Magnitud de $\mathbf{a}_{Cor} = 10,8$

Porcentaje de \mathbf{a}_{Cor} en $\mathbf{a}_C = 14,65\%$

3.3 Interpretación: programación

La interpretación se logra programando las ecuaciones planteadas, a partir de declaraciones de variables y matrices que permitan la valoración de caso presente en el ejercicio. Para luego obtener diferentes casos varían parámetros como las velocidades angulares y la posición del collar en el punto C. El programa de este elemento esta publicado en [15]. Se sugiere ser revisado e interpretado.

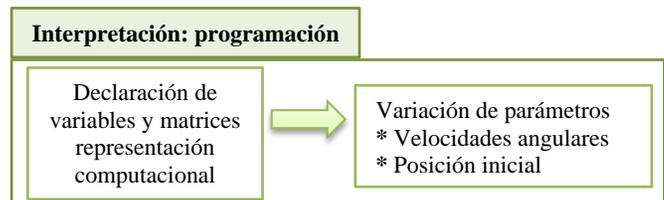


Figura 5: Diagrama etapa de interpretación. Sección de programación Fuente: Los autores.

3.4 Análisis de resultados de diferentes velocidades

En esta sección, se hace un análisis de algunos de los resultados obtenidos en el ejercicio desarrollado, los cuales ya fueron interpretados en el artículo de propuesta [13]. A continuación, se muestran los diferentes casos:

Caso 1: Variación de la velocidad angular ω_1

A. En la Figura 6, se observa como la aceleración de Coriolis aumenta su valor según va aumentando la posición inicial y la velocidad angular ω_1 . El mayor valor se presenta cuando la velocidad angular ω_1 es más alta, con 4 rad/s. El menor valor se presenta cuando no varía la velocidad angular, es decir cuando es cero. Las demás iteraciones se encuentran dentro del rango de los valores mencionados anteriormente.

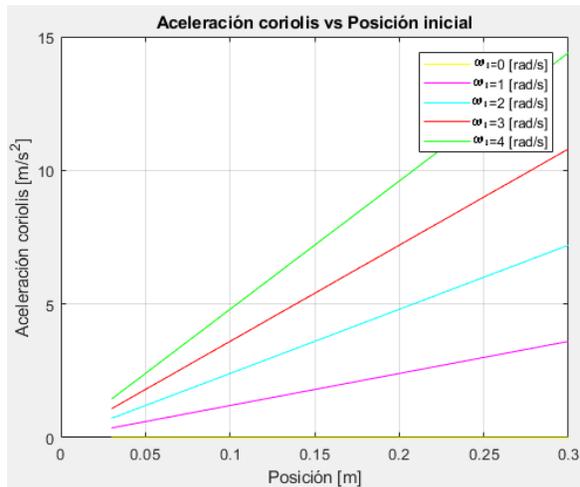


Figura 6: Aceleración de Coriolis vs Posición inicial, variando velocidad angular ω_1 .

Fuente: Artículo [13]

B. En la figura 7, se muestra como el porcentaje de la aceleración de Coriolis aumenta a medida que va aumentando la posición inicial y la velocidad angular ω_1 . El mayor valor se da cuando la velocidad angular ω_1 es más alta, con 4 rad/s. El menor valor se da cuando no varía la velocidad angular, es decir cuando es cero. Las demás iteraciones se encuentran dentro del rango de los valores mencionados anteriormente.

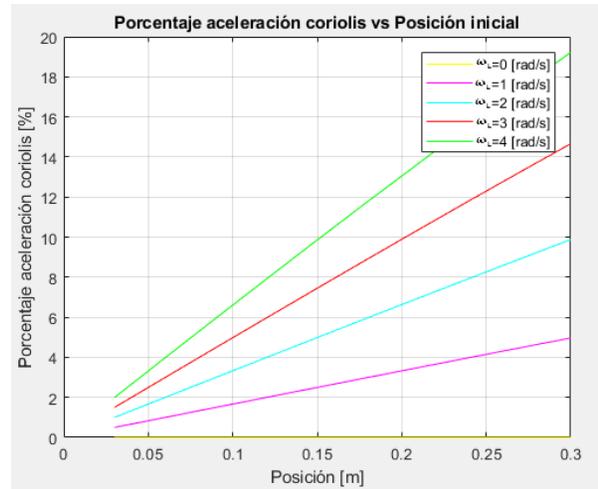


Figura 7: Porcentaje aceleración de Coriolis vs Posición inicial, variando velocidad angular ω_1 .

Fuente: Artículo [13]

Caso 2: Variación de la velocidad angular ω_2

A. En la Figura 8, se observa como la aceleración de Coriolis aumenta su valor según va aumentando la posición inicial y la velocidad angular ω_2 . El mayor valor se da cuando la velocidad angular ω_2 es más alta, con 4 rad/s. El menor valor se da cuando no varía la velocidad angular, es decir cuando es cero. Las demás iteraciones se encuentran dentro del rango de los valores mencionados anteriormente.

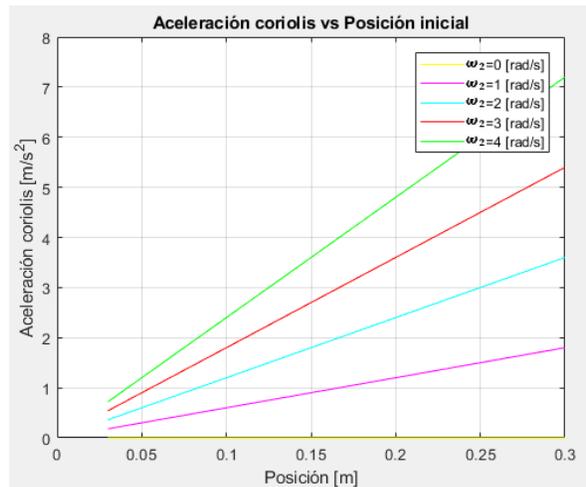


Figura 8: Aceleración de coriolis vs posición inicial, variando velocidad angular ω_2 .

Fuente: Artículo [13]

B. En la Figura 9, se muestra como el porcentaje de la aceleración de Coriolis aumenta a medida que va aumentando la posición inicial y la velocidad angular ω_2 . El mayor valor se da cuando la velocidad angular ω_2 es más alta, con 4 rad/s. El menor valor se da cuando no varía la velocidad angular, es decir cuando es cero. Las demás iteraciones se encuentran dentro del rango de los valores mencionados anteriormente, pero se puede observar que aumentan considerablemente su valor y

están más cerca de la línea de la mayor velocidad angular ω_2 . A diferencia de los anteriores resultados se encuentra que los porcentajes de aceleración de Coriolis son similares para las aceleraciones angulares ω_2 en los valores de (2, 3 y 4 rad/s).

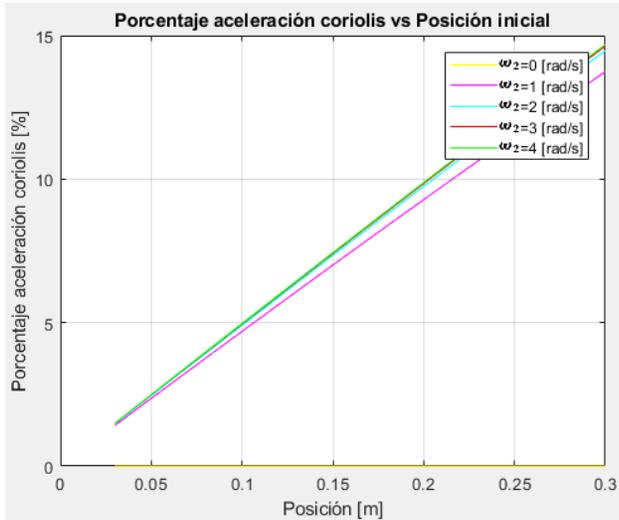


Figura 9: Porcentaje aceleración de coriolis vs Posición inicial, variando velocidad angular ω_2 .
Fuente: Artículo [13]

Caso 3: Variación de la velocidad angular ω_1 y ω_2 .

A. En la Figura 10, se observa que el mayor valor de la aceleración de Coriolis se da cuando las dos velocidades angulares ω_1 y ω_2 son mayores. También se muestra que la velocidad angular ω_2 crece de una forma más rápida ya que tiene mayor incidencia en el valor total.

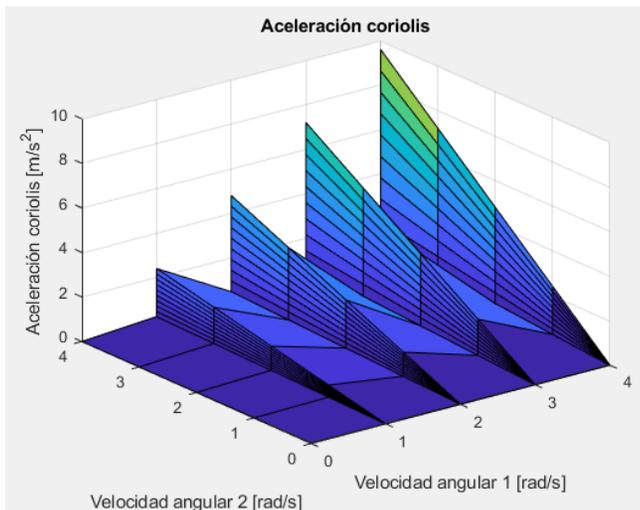


Figura 10: Aceleración de Coriolis variando velocidad angular ω_1 y velocidad angular ω_2 .
Fuente: Artículo [13]

B. En la figura 11, se observa que el mayor valor de la aceleración total en el collar se da cuando las dos velocidades angulares ω_1 y ω_2 son mayores.

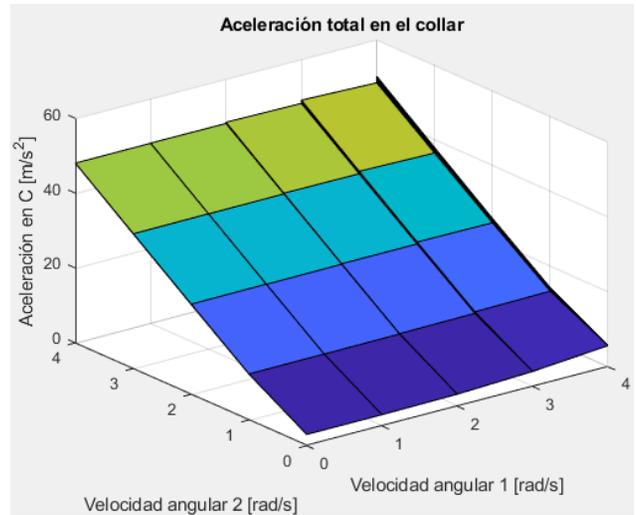


Figura 11: Aceleración total del collar variando velocidad angular ω_1 y velocidad angular ω_2 .
Fuente: Artículo [13]

Abstracción

- * Cuando $\omega_1 = 0$ se observa en la gráfica que el porcentaje de Coriolis es 0, ya que en este caso la única velocidad que afecta el collarín es $\omega_2 = \text{constante}$ y esto equivale a un sistema rotatorio que no se encuentra en un plano giratorio.
- * Se infiere que, el collarín al quedar en el extremo de la barra, su velocidad y su aceleración se estabilizarán ya que no habrá un desplazamiento lineal.
- * Se observa que el porcentaje de aceleración de Coriolis puede llegar a ser alto, lo cual implica tener cuidado al diseñar, ya que puede causar grandes variaciones y afectar los resultados esperados.

3.5 Elaboración primera encuesta

Para lograr hacer una valoración del aprendizaje de los estudiantes, se realiza un cuestionario, la cual fue propuesta en el artículo [13]. La encuesta enviada para analizar los conocimientos del tema de Coriolis fue la siguiente:

Preguntas conceptuales:

¿Qué es la coriolis?

¿Cuál es la derivada de un vector desde un sistema fijo con respecto a un sistema que rota?

Preguntas procedimentales:

¿Qué elementos se consideran en la aceleración de coriolis?

¿Cuántos sistemas de referencia son necesarios para el desarrollo del ejercicio?

¿Si aumenta la velocidad angular ω_2 , la tasa de crecimiento de la aceleración de coriolis es mayor?

¿Cuál de las dos velocidades angulares tiene más influencia en el fenómeno de Coriolis?

¿Qué tanto afecta la aceleración de coriolis, la aceleración total del sistema?

¿Porque al aumentar las dos velocidades angulares simultáneamente, aumenta la aceleración de coriolis?

Preguntas interpretación y abstracción:

¿Qué comando de programación usaría para iterar las variables de velocidad?

¿Cuántos “for” usaría para variar dos velocidades angulares y la posición inicial?

Con respecto a la pregunta anterior ¿Serían ciclos anidados o ciclos separados?

¿Almacenaría los resultados de las aceleraciones en matrices, vectores o en una variable?

Si existen tres “for” anidados, el primero varía de 1 a 5, el segundo de 1 a 5 y el tercero de 1 a 10. ¿En total, cuántos ciclos se ejecutan?

3.6 Resultados primera fase de evaluación

El primer cuestionario fue realizado a 27 estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín del programa de Ingeniería Mecánica que estaban cursando la asignatura de Dinámica, en el período académico 2019-01, a los cuales fue presentado el ejercicio en clase.

Se realizó de forma virtual, separando el total de los estudiantes en dos grupos de forma aleatoria de la siguiente forma: el primer grupo de 15 estudiantes recibieron, de manera complementaria, el artículo de Coriolis y los códigos asociados para que lo usaran como herramienta a la hora de contestar las preguntas. El otro grupo, conformado por los 12 estudiantes restantes, se estableció como control, dado que no les fue suministrado material de estudio complementario a la explicación del ejercicio realizada en el aula de clase.

A continuación, la Tabla 1 presenta las respuestas acertadas, tanto para el grupo de estudiantes que hizo uso del material complementario como para el grupo de control.

En la figura 12 se presentan las gráficas de los resultados obtenidos, mostrando un comparativo de cada sección de ambos grupos: el grupo de estudiantes que tuvieron acceso al material complementario y el grupo de control, destacando las respuestas correctas de un color más fuerte.

La hipótesis que se tenía, antes de realizar la encuesta, consistía en que: al aplicar la metodología propuesta en el artículo esto favorecería el aprendizaje de los estudiantes”; sin embargo, el resultado obtenido por ambos grupos al evaluar el concepto de la derivada del vector presenta un mal desempeño, como se puede observar en la Tabla 1. De otro lado, los resultados de la Figura 12, demuestran que hay una mejora en la sección de programación para los estudiantes que tuvieron la posibilidad de leer el artículo y revisar el código, no obstante, en las otras secciones no hay una diferencia marcada entre los estudiantes que accedieron al material complementario y los que no.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia la importancia de tener un programa que permita ampliar la capacidad de análisis logrando resultados que no sean triviales para el análisis. Además, la evidencia de que, en ambos casos, sigue existiendo gran dificultad para entender el concepto de la derivada del vector, generó la necesidad de realizar intervención en clase y en los instrumentos realizados, los cuales son aplicados en el segundo grupo análisis estudiantes de Dinámica del período 2019-02.

Resultados divididos por ambos grupos de estudiantes que respondieron encuesta.

Pregunta	Acceso a material complementario (15) [%]	Control (12) [%]	Sección
¿Qué es la Coriolis?	100	100	
¿Cuál es la derivada de un vector desde un sistema fijo con respecto a un sistema que rota?	6.7	16.7	Conceptualización
¿Qué elementos se consideran aceleración de Coriolis?	13.3	16.7	
¿Cuántos sistemas de referencia son necesarios para el desarrollo del ejercicio?	86.7	75	
¿Cuál de las dos velocidades angulares tiene más influencia en el fenómeno de Coriolis?	46.7	50	Procedimiento
¿Qué tanto afecta la aceleración de Coriolis, la aceleración total del sistema?	80	91.7	
Si aumenta la velocidad angular 2, la tasa de crecimiento de la aceleración de Coriolis es mayor.	73.3	75	
¿Porque al aumentar las dos velocidades angulares simultáneamente, aumenta la aceleración de Coriolis?	73.3	66.7	
¿Qué comando de programación usaría para iterar las variables de velocidad?	73.3	25	
¿Cuántos “for” usaría para variar dos velocidades angulares y la posición inicial?	60	41.7	
Con respecto a la pregunta anterior ¿Serían ciclos anidados o ciclos separados?	86.7	66.7	Programación
¿Almacenaría los resultados de las aceleraciones en matrices, vectores o en una variable?	20	41.7	
Si existen tres “for” anidados, el primero varía de 1 a 5, el segundo de 1 a 5 y el tercero de 1 a 10. ¿En total, cuántos ciclos se ejecutan?	40	41.7	

Fuente: Los autores.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia la importancia de tener un programa que permita ampliar la capacidad de análisis logrando resultados que no sean triviales para el análisis. Además, la evidencia de que, en ambos casos, sigue existiendo gran dificultad para entender el concepto de la derivada del vector, generó la necesidad de realizar intervención en clase y en los instrumentos realizados, los cuales son aplicados en el segundo grupo análisis estudiantes de Dinámica del período 2019-02.

Tabla 1:

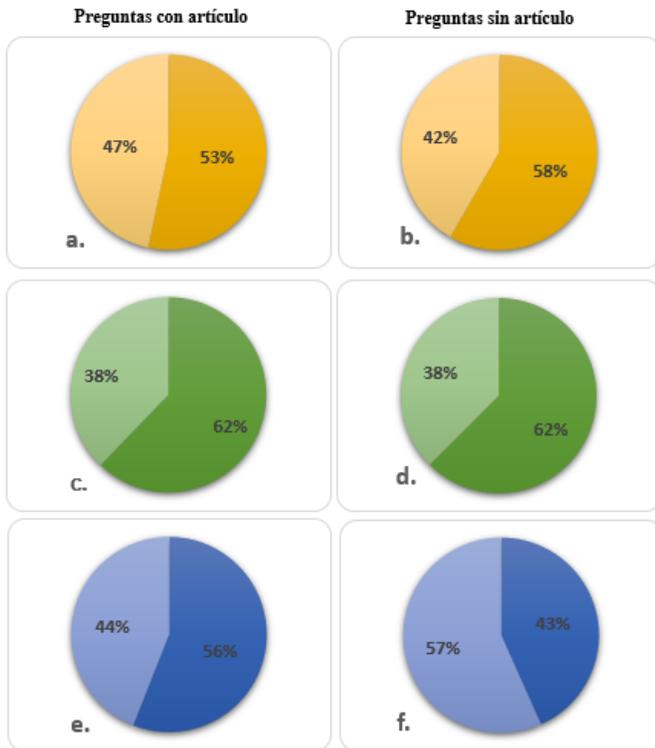


Figura 12: Resultados en porcentajes las respuestas correctas de cada sección del primer cuestionario. **a.** Sección de conceptualización con artículo. **b.** Sección de conceptualización sin artículo. **c.** sección de procedimiento con artículo. **d.** sección de procedimiento sin artículo. **e.** sección de programación con artículo. **f.** sección de programación sin artículo. Fuente: Los autores

3.7 Propuesta de mejoras para el segundo cuestionario

Para facilitar el entendimiento del código se documentan las líneas explicando qué hace cada una de ellas. Se propone una actividad de interacción con el código para analizar otros casos, es decir, un ejercicio donde puedan hacer uso del código suministrado en el artículo para resolverlo, modificando variables y analizar casos diferentes que no estén presentes en el artículo. De esta manera, se puede demostrar las limitaciones que existen para proyectar resultados de muchos casos sin contar con una herramienta computacional.

También se propone explorar la percepción cualitativa del estudiante, en donde especifique qué tan útil le pareció el artículo y si fue de ayuda para afianzar los conocimientos.

Ejercicios complementarios. Después de analizar el desempeño del primer grupo, se encontró necesario plantear unos ejercicios complementarios que permitan a los estudiantes explorar resultados usando como herramienta los algoritmos propuestos de esta manera se proponen las siguientes preguntas.

Los resultados esperados para los ejercicios propuestos. Se deja a cada estudiante su interpretación.

¿Cómo varía la velocidad en el collar si la longitud del vector OA es de 500 mm?

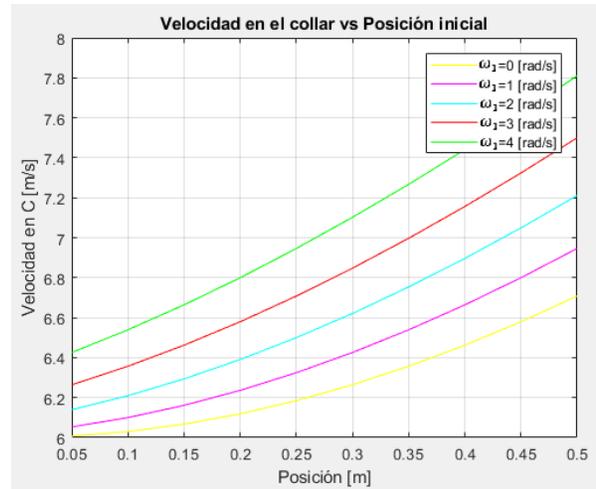


Figura 13: Respuesta ejercicio 1 Fuente: Los autores.

¿Qué tanto afecta a la aceleración de coriolis si la velocidad angular ω_2 tiene un valor de 10 rad/s?

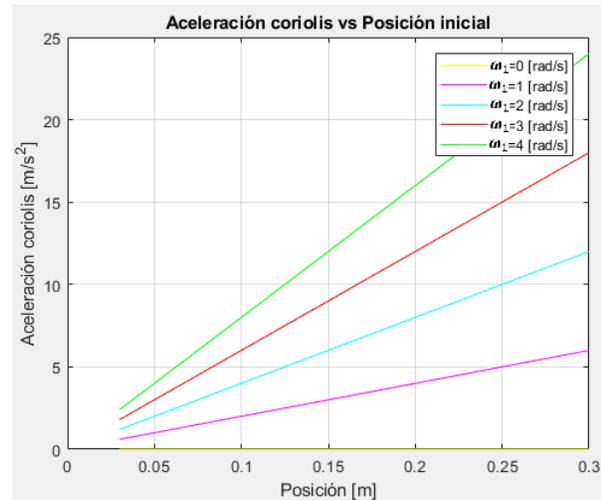


Figura 14: Respuesta ejercicio 2. Fuente: Los autores.

¿Cómo varía la aceleración total en el collar, si la velocidad y aceleración lineal del collar es de 9 m/s y 3 m/s² respectivamente?

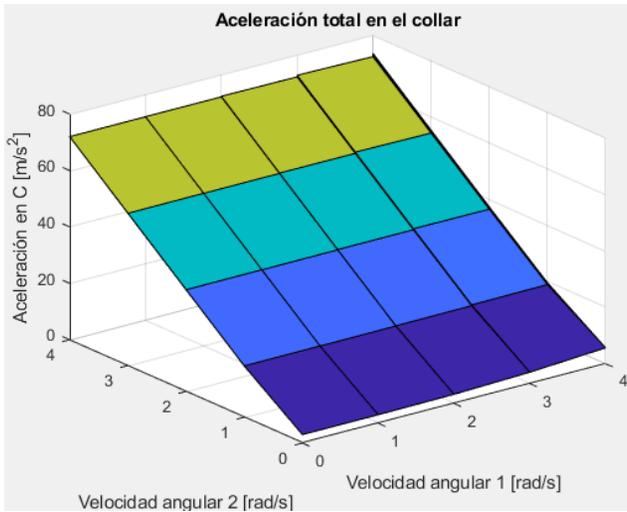


Figura 15: Respuesta ejercicio 3.
Fuente: Los autores.

A continuación, se realizan las mejoras correspondientes al segundo cuestionario.

Preguntas de interpretación y abstracción:

Haciendo uso del código, resuelva los siguientes ejercicios y muestre el resultado de cada uno:

¿Cómo varía la velocidad en el collar si la longitud del vector OA es de 500 mm? Ayuda: Usar código donde varía W2

¿Qué tanto afecta a la aceleración de coriolis si la velocidad angular 2 tiene un valor de 10 rad/s? Ayuda: Usar código donde varía W1

¿Cómo varía la aceleración total en el collar, si la velocidad y aceleración lineal del collar es de 9 m/s y 3 m/s² respectivamente? Ayuda: Usar código donde varían W2 y W2

Preguntas de percepción:

¿Le gustó el artículo?

¿Fue fácil la lectura y entendimiento del artículo?

¿Le ayudó a afianzar sus conocimientos en el tema de Coriolis?

¿Qué comentarios o sugerencias tiene para mejorar el artículo?

3.8 Resultados segundo cuestionario

El segundo cuestionario fue realizado a 26 estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín del programa de Ingeniería Mecánica que estaban cursando la asignatura de Dinámica, en el período académico 2019-02, a los cuales fue presentado el ejercicio en clase. Se realizó de forma virtual, separando el total de los estudiantes en dos grupos de forma aleatoria de la siguiente forma: el primer grupo de 11 estudiantes recibieron, de manera complementaria, el artículo de coriolis y los códigos asociados para que lo usaran como herramienta a la hora de contestar las preguntas. El otro grupo, conformado por los 15 estudiantes restantes, se estableció como control, dado que no les fue suministrado material de estudio complementario a la explicación del ejercicio realizada en el aula de clase.

Tabla 2: Resultados divididos por ambos grupos de estudiantes que respondieron encuesta.

Pregunta	Acceso a material complementario (11) [%]	Control (15) [%]	Sección
¿Qué es la coriolis?	100	100	Conceptualización
¿Cuál es la derivada de un vector desde un sistema fijo con respecto a un sistema que rota?	72.7	60	
¿Qué elementos se consideran aceleración de Coriolis?	54.5	73.3	
¿Cuántos sistemas de referencia son necesarios para el desarrollo del ejercicio?	72.7	73.3	
¿Cuál de las dos velocidades angulares tiene más influencia en el fenómeno de Coriolis?	54.5	60	Procedimiento
¿Qué tanto afecta la aceleración de Coriolis, la aceleración total del sistema?	100	60	
Si aumenta la velocidad angular 2, la tasa de crecimiento de la aceleración de coriolis es mayor.	90.9	86.7	
¿Porque al aumentar las dos velocidades angulares simultáneamente, aumenta la aceleración de coriolis?	90.9	66.7	Programación
¿Qué comando de programación usaría para iterar las variables de velocidad?	81.8	73.3	
¿Cuántos "for" usaría para variar dos velocidades angulares y la posición inicial?	90.9	60	
Con respecto a la pregunta anterior ¿Serían ciclos anidados o ciclos separados?	90.9	73.3	
¿Almacenaría los resultados de las aceleraciones en matrices, vectores o en una variable?	100	93.3	
Si existen tres "for" anidados, el primero varía de 1 a 5, el segundo de 1 a 5 y el tercero de 1 a 10. ¿En total, cuántos ciclos se ejecutan?	63.6	66.7	Ejercicios
Ejercicio 1	27.3	60	
Ejercicio 2	81.8	40	
Ejercicio 3	63.6	53.3	

Fuente: Los autores

En la Figura 16 se presentan las gráficas de los resultados obtenidos, mostrando un comparativo de cada sección de ambos grupos: el grupo de estudiantes que tuvieron acceso al material complementario y el grupo de control, destacando las respuestas correctas de un color más fuerte.

En general, las respuestas de la sección de percepción con respecto a quienes leyeron el artículo fueron:

1. Para el 82% de los estudiantes el artículo resultó fácil de entender

2. El 91% de los estudiantes consideró que la lectura de artículo resultó de utilidad para afianzar los conocimientos en Coriolis

3. Dos estudiantes sugieren mejorar los códigos porque no corren adecuadamente.

De acuerdo con los resultados mostrados en el cuestionario realizado en los periodos académicos 2019-1 y 2019-2, se puede observar que ambos grupos de estudiantes: estudiantes con acceso a material complementario tuvieron una mejoría en todos los aspectos evaluados. También se evidencia que el porcentaje de preguntas correctas fue más alto en todas las secciones para los estudiantes que tuvieron acceso al material complementario, tanto artículo como código, especialmente en la sección de programación con una diferencia del 12%.

Con respecto a la percepción de los estudiantes se puede afirmar que el artículo fue una herramienta facilitadora, ya que los ayudó a afianzar los conocimientos que habían obtenido previamente en la clase dictada de forma presencial. Resaltan que les sirvió para entender mejor el ejercicio y el uso de los sistemas de referencia, además, les pareció bueno que se mostrara la parte de programación, ya que les ayudó a ver cómo funciona y a entender cómo se comporta el fenómeno de Coriolis gracias a las gráficas realizadas a partir de los códigos suministrados.

Adicional a la aplicación del cuestionario, al grupo 2019-02, tanto los estudiantes con acceso al material complementario como el grupo de control, fue aplicada una actividad evaluativa del tema de coriolis, en cuyo resultado se puede notar que el desempeño de los estudiantes con acceso al material de apoyo fue superior en una escala de 0.0 a 5.0, como se muestra a continuación en la Figura 21.

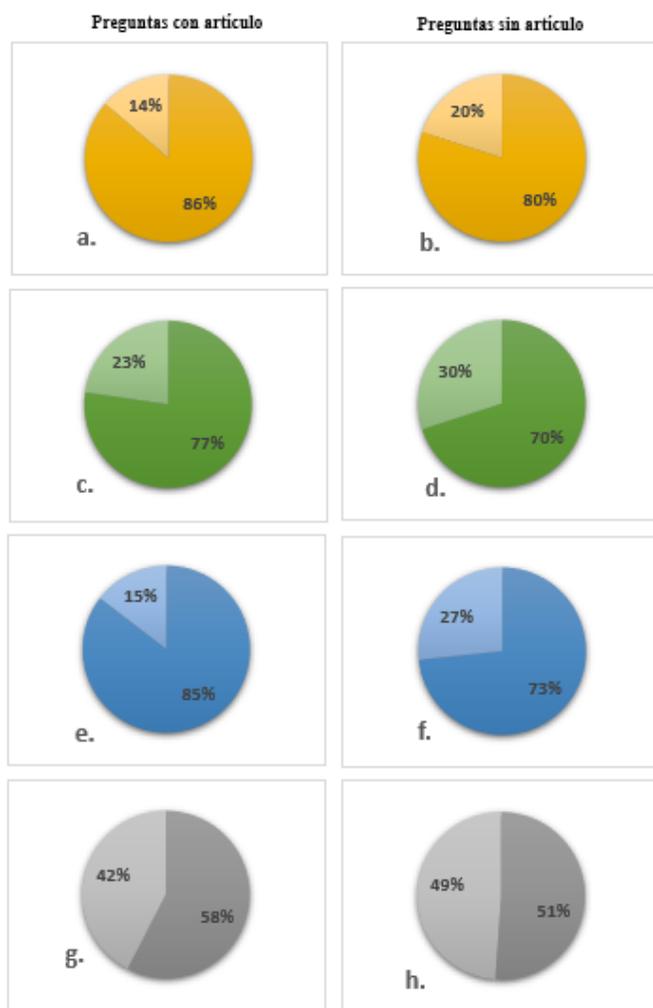


Figura 16: Resultados en porcentajes las respuestas correctas de cada sección del segundo cuestionario. **a.** Sección de conceptualización con artículo. **b.** Sección de conceptualización sin artículo. **c.** Sección de procedimiento con artículo. **d.** Sección de procedimiento sin artículo. **e.** Sección de programación con artículo. **f.** Sección de programación sin artículo. **g.** Sección de ejercicios con artículo. **h.** Sección de ejercicios sin artículo.

Fuente: Los autores.

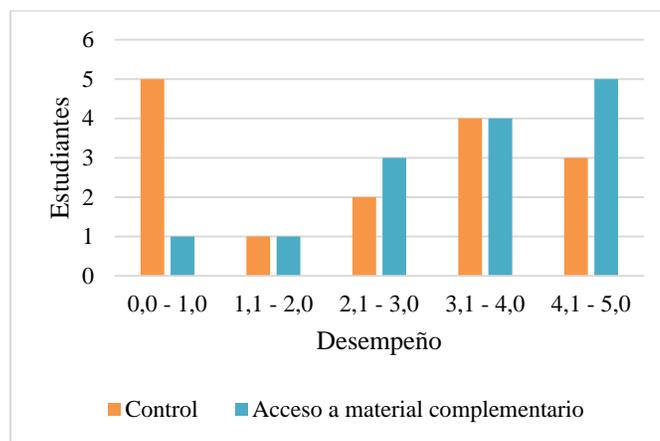


Figura 17: Pertinencia de comportamientos académicos

Fuente: Los autores

En la figura 17, en apariencia se observa un desempeño superior en los estudiantes que contaron con material de estudio adicional. Para validar esta información, se define un diseño de experimentos de un solo factor, con el fin de verificar la diferencia estadística de las medias de calificación entre el grupo de estudiantes que tuvo acceso al material de estudio complementario y el grupo de control. Para ello, se definen los parámetros enunciados en la Tabla 3:

Tabla 3. Parámetros del diseño de experimentos

Factor	Acceso a material de estudio complementario	
Niveles	0: Control	1: Con acceso
Variable respuesta	Calificación: Valores numéricos de 0.0 a 5.0	
Significancia	0.1	
Hipótesis nula H_0	$\mu_0 = \mu_1$	
Hipótesis alterna H_A	$\mu_0 \neq \mu_1$	

Fuente: Los autores

Se establece una significancia de 0.1 para la prueba de hipótesis de diferencia entre las medias de las calificaciones de los dos grupos analizados, en términos de que si bien el estudio está orientado a establecer la influencia de material complementario en el tema de Coriolis sobre el desempeño de los estudiantes en una actividad evaluativa, no se puede asumir que otros factores como el tiempo de dedicación o las habilidades de los estudiantes en el procesamiento matemático no jueguen un rol importante en las calificaciones obtenidas.

Se valida normalidad de los valores de calificaciones obtenidas por los estudiantes del grupo de Dinámica 2019-2 sometiendo los datos a una prueba de bondad de ajuste, evidenciando un valor P de 0.033, menor a 0.05, por lo cual se concluye que los datos se ajustan en un porcentaje superior al 95% a una distribución normal

Además, se encuentran diferencias de los promedios de las notas entre los dos grupos que tuvieron acceso al material complementario y el grupo de control. En la siguiente tabla se muestra el promedio de las notas del parcial de los estudiantes con acceso a material complementario y del grupo de control.

Para evaluar la diferencia estadística entre las medias de las calificaciones obtenidas por los estudiantes se realiza un análisis de varianza (ANOVA), cuya condición para aceptar la hipótesis alterna (las medias de desempeño entre los grupos evaluados son diferentes) es que el valor P sea inferior al nivel de significancia establecido de 0.1. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Medias y validación estadística

Niveles	μ	σ	$\Delta\mu$	Valor T	Valor P
0 (Control)	2.63	1.61	0.881	1.58	0.063
1 (Con acceso)	3.51	1.21			

Fuente: Los autores

Dado que el valor P es menor al nivel de significancia predefinido ($0.063 < 0.1$) se rechaza la hipótesis nula, esto implica que para un ajuste del 90% de los datos evaluados, las calificaciones obtenidas por los estudiantes con acceso al material de estudio complementario fueron superiores a los estudiantes del grupo de control.

La Figura 18 muestra tanto la diferencia en las medias de los grupos analizados y la dispersión de los datos en las calificaciones. Adicionalmente, se observa una concentración importante de calificaciones inferiores a la media en los estudiantes pertenecientes al grupo de control (nivel 0).

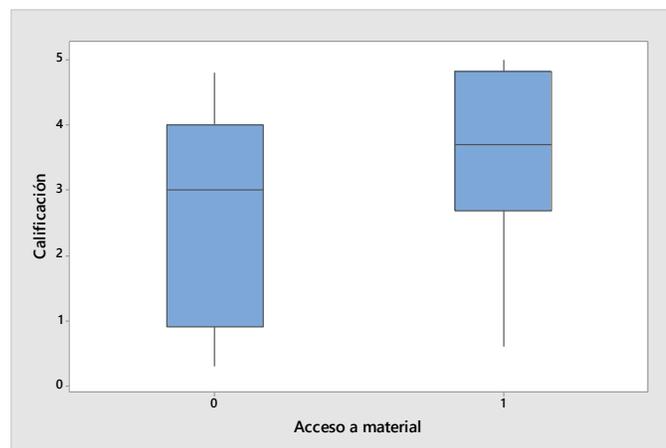


Figura 18: Diagrama de caja de calificaciones por grupo de estudiantes
Fuente: Los autores

4 Conclusiones

De los resultados obtenidos en la primera fase de valoración de la estrategia (Dinámica 2019-1), se lograron identificar mejoras en las habilidades de programación en los estudiantes que tuvieron acceso al material de estudio complementario, visualizado en los resultados de los cuestionarios en esta sección.

De manera similar y posterior a aplicar las mejoras al proceso de valoración de la estrategia, en la segunda fase (Dinámica 2019-2) se evidenció un aumento en el desempeño generalizado en las habilidades evaluadas mediante el cuestionario en los estudiantes que tuvieron acceso al material de estudio complementario respecto a los pertenecientes al grupo de control. Adicionalmente, en una de las actividades evaluativas del curso realizadas en la segunda etapa, se pudo corroborar la mejora en las competencias del grupo analizado a partir de una prueba de hipótesis, demostrando la importancia que tiene diversificar el material de apoyo al que tienen acceso los estudiantes en su proceso formativo.

Para finalizar, es importante enfatizar en el hecho de que, en particular, el uso del estudio de caso de Coriolis en el proceso formativo de los estudiantes, por sí solo, no garantiza el desarrollo de las habilidades de solución. Por ello, se hace necesario generar herramientas didácticas en los cuales los estudiantes se apropien del proceso e incursionen en el aprendizaje autónomo basado en sus necesidades particulares, con una guía e instrucción docente. En este sentido, consideramos que el material desarrollado, no solo permite mejorar las habilidades puntuales en el tema de Coriolis, sino a su vez estructura diferentes etapas en las cuales fortalecer los procesos formativos.

Referencias

- [1] H. Dankowicz, "Teaching advanced modeling of multibody mechanisms to non-traditional engineering students", *American Society for Engineering Education*, pp. 1-6, marzo-abril, 2006.
- [2] F. Akasheh, K. Dawson & J. Rocha, J., "Comprehensive approach to teaching dynamics of planar mechanisms based on modern learning theories". *American Society for Engineering Education*, junio, 2013.
- [3] J. Domènech-Casal, J. Gasco, P. Royo & S. Vilches, "Proyecto CRASH: enseñando cinemática y dinámica en el contexto del análisis pericial de accidentes". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15(2). 2013.
- [4] J. Gallardo, E. Flores, C. Aguilar & L. Pérez, "Aceleración de coriolis, un método de fácil enseñanza/aprendizaje". *Revista Pistas Educativas*, Vol. 40. No. 131. 2018.
- [5] C. Enrique, G. Alzugaray, "Modelo de enseñanza-aprendizaje para el estudio de la cinemática de un volante inercial usando tecnologías de la información y la comunicación en un Laboratorio de Física". *Revista formación universitaria*. Vol. 6(1), pp. 3-12, 2013.
- [6] S. I. Sánchez, M. A. Moreira & S. C. Caballero, "Implementación de una propuesta de aprendizaje significativo de la cinemática a través de la resolución de problemas". *Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 17, nº 1, pp. 27-41, 2009.
- [7] N. G. Richmond, J. L. Guerrero & N. Ureña, "Método "Solución de problemas por objetivos" para la enseñanza de mecánica vectorial en ingeniería, caso de estudio: dinámica". *Revista Educación en Ingeniería*, 14(28), pp. 25-32. 2019.
- [8] C. Trujillo & E. Gonzales, "Aprendizaje activo en cursos básicos de ingeniería: un ejemplo en la enseñanza de Dinámica". *Revista Unipluri-versidad*, 10(2), 2010.
- [9] D. A. Mesa, D. Jiménez & A. Restrepo, "Análisis cinemático del lanzamiento de un *frisbee* mediante acelerómetros y análisis de imágenes digitales". *Revista Politécnica*, 14(27), pp. 09-19, 2018.
- [10] J. C. Urango, et al, "Validación del uso de fotoelasticidad como herramienta para los cursos de mecánica de sólidos". *Revista EIA*. Vol. 14, No.28, pp. 117-131. 2017.
- [11] J. C. Urango & A. Restrepo, "Desarrollo de un modelo computacional de imágenes de fotoelasticidad para el análisis de esfuerzos dinámicos de rotación en discos de PMMA". Encuentro Internacional de la Educación en Ingeniería ACOFI. pp.295-296. 2018.
- [12] J. P. Gallego, M. Franco & A. Restrepo, "Actividad de evaluación de la aceleración de Coriolis basado en el uso de la programación secuencial para fomentar el aprendizaje integral de estudiantes de Ingeniería Mecánica". Encuentro Internacional de la Educación en Ingeniería ACOFI. pp.119-120. 2018.
- [13] G. Betancur, L. Marín & A. Restrepo, Propuesta didáctica para el aprendizaje en el fenómeno de coriolis en un ejemplo tridimensional. Encuentro Internacional de la Educación en Ingeniería ACOFI. 2019.
- [14] R. C. Hibbeler, Ingeniería mecánica. Dinámica. Pearson Education, Inc. pp. 553, 2010.
- [15] G. Betancur, Código de MatLab almacenado en el repositorio GitHub. (2019). <https://github.com/gbetancurm/EjercicioCoriolis>

Resumen de la hoja de vida de los autores

G. Betancur-Montoya, estudiante de pregrado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. ORCID: 0000-0002-1694-6410.

L.T Marín-Urrego, estudiante de pregrado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. ORCID: 0000-0002-1634-9958.

L.C. Álvarez-Gil, Ingeniera de Petróleos en el 2014. Magister en Ingeniería Mecánica en el 2019. Actualmente profesora de Cátedra con vinculación a tiempo parcial en la Institución Universitaria Pascual Bravo. ORCID: 0000-0001-8219-6366.

A. Restrepo-Martínez, Ingeniero Mecánico en el 2000. Magister en Ingeniería de Sistemas en el 2004, Doctor en Ingeniería en el 2008. Actualmente es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en donde dicta la asignatura de Dinámica para el programa de Ingeniería Mecánica. ORCID: 0000-0001-8978-2077.