



**Innovation in research and engineering education:
key factors for global competitiveness**

*Innovación en investigación y educación en ingeniería:
factores claves para la competitividad global*

MEJORAR LA COMPRENSIÓN DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LOS CONCEPTOS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE SISTEMAS DINÁMICOS

Michaël Canu, Mauricio Duque

**Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia**

Cécile de Hosson

**Universidad Paris Diderot
Paris, Francia**

Resumen

En los cursos de control en ingeniería, los estudiantes tienen usualmente dificultades para comprender los conceptos de equilibrio y estabilidad, los cuales son centrales en la disciplina. La introducción de estos conceptos se sustenta generalmente en ejemplos "clásicos" de estudio de la mecánica newtoniana enriquecidos con un sistema de control.

A lo largo del programa del curso, los conceptos de equilibrio y estabilidad son tratados de diferentes formas, en distintos momentos: En las primeras etapas, la aproximación es estática, en física mecánica por ejemplo, y luego, por medio del análisis dinámico, en los cursos de control. Las diferencias entre estas aproximaciones no han sido investigadas, así como tampoco lo ha sido la manera en que los dos conceptos mencionados están vinculados. Se asume que todo esto representa una fuente mayor de confusión y podría ser el origen de las concepciones erróneas que los estudiantes de ingeniería tienen sobre el tema. Varios estudios han mostrado que los estudiantes encuentran obstáculos para comprender casos mecánicos simples en su vida cotidiana o académica. Otros estudios muestran que la comprensión del equilibrio y la estabilidad está fuertemente afectada cuando los sistemas estudiados se encuentran en un marco de referencia en movimiento, inercial o no. Por ejemplo, la existencia de posiciones de equilibrio inestables es cuestionada por los estudiantes cuando el sistema se parece a un péndulo, debido a la utilización de una aproximación basada en la velocidad para explicar el comportamiento del sistema. Este estudio está basado en un cuestionario aplicado vía internet en donde se presentan "situaciones estáticas en el tiempo", las cuales buscan hacer surgir las ideas y concepciones erróneas de los estudiantes en torno al equilibrio y la estabilidad. Esta aproximación permite resaltar el razonamiento utilizado, el cual se basa en la diferencia

entre las configuraciones iniciales y las finales. Este razonamiento es una aplicación de la definición propuesta por Lyapunov y que a menudo se encuentra únicamente en lenguaje matemático en los cursos de control. En efecto, los problemas de comprensión de los estudiantes resultan de un razonamiento inadecuado más que de una falta de conocimientos en relación con los conceptos mecánicos de equilibrio y estabilidad. Muchos de los cursos clásicos de ingeniería en control se focalizan en conocimientos declarativos y procedimentales que impiden que los estudiantes comprendan de una manera adecuada. Mejorar la comprensión implica cambios en las estrategias de razonamiento, similares a las que proponemos en este estudio, lo que parece ser difícil en cursos clásicos de control. La metodología de ingeniería didáctica propuesta implica un estudio específico para identificar las concepciones erróneas.

En esta perspectiva proponemos un ejemplo de experimentos novedosos de enseñanza que buscan facilitar el cambio conceptual. Este ejemplo muestra que se pueden aprovechar situaciones bien seleccionadas para mejorar la comprensión de los conceptos de equilibrio y estabilidad de los estudiantes de ingeniería.

Palabras clave: equilibrio; estabilidad; sistemas de control; formas de pensar de los estudiantes; cambio conceptual; ingeniería didáctica; estrategias de clase; concepciones erróneas

Abstract

Engineering students on control courses lack of an understanding of equilibrium and stability which are crucial concepts in this discipline. The introduction of these concepts is generally based on the study of “classical” examples from Newtonian mechanics enriched by a control system.

Throughout the engineering syllabus, equilibrium and stability are approached in different ways, at different academic stages: at early stages in essentially static ways, in mechanics for example, and later, by dynamical analysis, in control courses. There is little clarification of the differences between those ways and how the underlying concepts are linked. We assume that it is a major source of confusion and misunderstanding for engineering students.

Several studies have shown that students encounter difficulties in understanding simple familiar or academic static cases from mechanics. Some others shown that the understanding of equilibrium and stability is strongly disturbed when the studied systems are placed either in inertial or non-inertial moving reference frames. For example, the existence of unstable equilibrium positions is questioned by students when the system looks like the pendulum because of the use of a velocity-based approach to explain the behavior of the system.

Our study is based on “timed-static situations” which show students’ ideas and misconceptions about equilibrium and stability through web questionnaires. This approach allows to highlight a rationale based on the difference between initial and final system configurations. This kind of rationale is a direct easy-to-use translation of the mathematics definition of stability proposed by Lyapunov that can be found only in mathematics language in control courses.

In fact, few of students’ problems seem to be linked directly to a lack of knowledge concerning the mechanical concepts of equilibrium and stability but results from an inappropriate reasoning. While many classical engineering control courses are focused on declarative and procedural knowledge they cannot

improve students' understanding of many situations because this implies strategic skills or reasoning like the one we propose in this study.

Our approach involves educational inquiry in order to identify students' misconceptions as well as a didactic engineering. In this perspective, we propose an example of innovative teaching experiment that allows students' conceptual change. This example shows that one could take advantage of well-chosen situations in order to improve the engineering students' understanding of equilibrium and stability concepts.

Keywords: *equilibrium; stability; control systems; student way of thinking; conceptual change; didactic engineering; classroom strategies; misconceptions*

1. Introducción

En los cursos de control en ingeniería, los estudiantes tienen usualmente dificultades para comprender los conceptos de equilibrio y estabilidad, los cuales son centrales en la disciplina. La introducción de estos conceptos se sustenta generalmente en ejemplos "clásicos" de estudio de la mecánica newtoniana enriquecidos con un sistema de control. Cuando los estudiantes llegan al nivel universitario, ya han abordado estos conceptos previamente, al menos de forma intuitiva. A lo largo del programa, los conceptos de equilibrio y estabilidad son tratados en diferentes formas en diferentes momentos: en las primeras etapas la aproximación es estática, en física mecánica por ejemplo, y luego, por medio del análisis dinámico, en los cursos de control. Las diferencias entre estas aproximaciones no han sido investigadas, así como tampoco lo ha sido la manera en que los dos conceptos mencionados están vinculados (Albanese, 1998). Además, los estudiantes han encontrado varios sistemas de la vida cotidiana en equilibrio estable, inestable o indiferente sin un proceso de estudio suficientemente riguroso. Si no saben exactamente cómo funcionan, los unen inconscientemente a la noción de equilibrio o de estabilidad. En este estudio se asume que ésta es una fuente importante de confusión y posiblemente es el origen de las concepciones erróneas que los estudiantes tienen sobre este tema.

2. Los conceptos de equilibrio y de estabilidad

Tradicionalmente estos conceptos son abordados al momento de estudiar los sistemas mecánicos o químicos; es decir, antes de comenzar el curso de control. Varios criterios o procedimientos de cálculo se enseñan a los estudiantes en estas dos disciplinas. Por ejemplo, en mecánica, el equilibrio de un sistema puntual está definido cuando la sumatoria de todas las fuerzas exteriores es nula, y si es un sistema compuesto de un cuerpo sólido, cuando la sumatoria de todas las fuerzas y de todos los momentos exteriores es nula. En este caso, el sistema puede ser *libre* o *controlado*, pero generalmente los sistemas estudiados en mecánica son *libres* (un *sistema* se denomina *libre* cuando no está *controlado*, ya sea porque no tiene *entrada*, ya sea porque la señal de entrada de la planta es nula).

En cursos de introducción al control, los estudiantes descubren nuevos criterios de equilibrio o de estabilidad pero generalmente estos criterios son fundamentalmente matemáticos (criterio de Routh, valor de los polos de la función de transferencia, entre otros) y aplicados a *sistemas controlados* directamente en una aproximación *entrada-salida*.

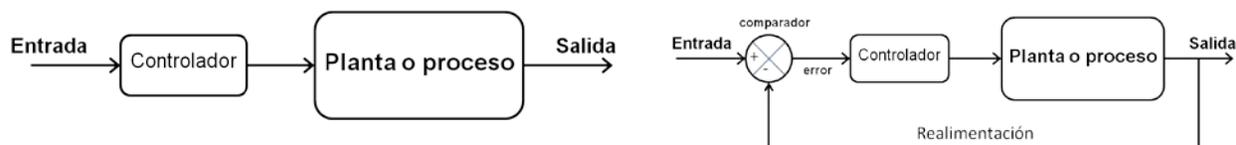


Figura 1. Sistema controlado de lazo abierto (a la izquierda) y cerrado (a la derecha)

La Figura 1 muestra dos esquemas de sistemas que se estudian en control. Cuando una o varias de las *salidas*, que incluyen o no la variable cuyo valor se quiere controlar, está unida a la entrada del sistema por un dispositivo adecuado, llamado *controlador* (*corrector* o *regulador*), el sistema se denomina cerrado o en *lazo cerrado*. En caso contrario, se denomina en *lazo abierto*. El valor deseado para la salida es llamado *referencia* y se compara con el valor actual de la misma salida, formando una señal llamada *error*, la cual mide la desviación entre el valor deseado y el logrado. La señal de error es introducida en general al regulador que se encarga de calcular la señal que va a ser enviada a la entrada del sistema. El sistema de lazo cerrado con el corrector es a su vez un nuevo sistema (denominado sistema realimentado).

Con estas definiciones se puede proponer una definición de estabilidad basada en el comportamiento entrada-salida del sistema.

3. Concepciones y cambio conceptual

Desde un punto de vista constructivista del aprendizaje, los alumnos no vienen a la clase sin ideas o conocimientos previos. Tienen conocimientos que resultan de una construcción que les permite interpretar o predecir eventos del mundo que los rodea (Ausubel, 1969). Sin embargo, estas concepciones no coinciden en todos los casos con el saber establecido incluidas las teorías científicas. En algunos casos, permiten entender los fenómenos naturales o experimentales desde una perspectiva muy superficial o ingenua, pero en otros casos, entre ellos los de la ingeniería, no funcionan y pueden llevar a errores importantes. El objetivo del aprendizaje es modificar estas concepciones erróneas, “reemplazándolas” por nuevas concepciones más cercanas al saber establecido y que permitan entender una clase más grande de situaciones; este proceso se denomina cambio conceptual (Posner *et al.*, 1982; Vergnaud, 1978).

Así, al referirnos a los estudiantes universitarios o de escuelas de ingenieros, se puede inferir la existencia de varios tipos de concepciones del equilibrio *antes* de un curso de control.

Los estudios realizados en Francia (Canu *et al.*, 2012) y en Colombia (Tamayo *et al.*, 2012) y las investigaciones en los Estados Unidos (Palmer, 2001; Ortiz, 2005; Newcomer, 2008) permiten identificar al menos tres concepciones diferentes del equilibrio, que se resumen en la figura 2 (plano RC 1):

- Equilibrio-Inmóvil
- Equilibrio-Estable
- Equilibrio-Inestable

Estas concepciones son utilizadas por los alumnos en situaciones de equilibrio (o cuando piensan que se está en una situación de equilibrio) para sistemas que en la mayoría de los casos no son controlados. La elección de una de estas concepciones depende de las características de la situación y de la proximidad con una situación familiar (académica o no). Así, si la situación propuesta es cercana a la que los alumnos

conocen, el razonamiento puede conducir a una comprensión *local* operacional del comportamiento del sistema, pero si hay un parámetro suplementario (un desplazamiento, por ejemplo) ya no funciona.

Por ejemplo, en una escuela de ingeniería en Francia, en una prueba de reconocimiento de un estado de equilibrio sobre un sistema mecánico como el péndulo, se encuentran porcentajes de respuestas correctas del 100% (n=103) en un caso estático, las cuales descienden al 74% en caso de movimiento rectilíneo y uniforme del soporte (con respecto al suelo) del eje de rotación, y a 64% en caso de movimiento uniformemente acelerado. Sobre un sistema diferente, representado por ecuaciones de movimiento similares (una bola sobre una media esfera cóncava hacia abajo), los porcentajes son de 100%, 65% y 43% para las mismas condiciones. Esto indica un razonamiento basado en la concepción denominada “equilibrio-inmóvil”.

De la misma manera, en el caso del estudio de la balanza o también de la polea (con iguales masas en cada lado) en una posición no horizontal, más de un cuarto (para el caso de la polea, ver Gunstone, 1987) de los estudiantes dice que el sistema va a cambiar de posición y volver a la posición horizontal (a menudo llamada “natural”) sin pensar en la causa de este movimiento. Esta concepción que nosotros hemos denominado “equilibrio-estable” no está vinculada de manera explícita con el concepto de *estabilidad* que tienen los estudiantes. Sin embargo, el razonamiento utilizado corresponde a una de las definiciones de estabilidad (además, una definición muy operacional).

Este razonamiento puede ser reforzado por un estudio de las balanzas de tipo romano o clásico, como las que se utilizan en las escuelas primarias. En efecto, en estos casos, solo la posición de equilibrio horizontal es tomada en cuenta, si bien existe una infinidad de posiciones de equilibrio.

Estas concepciones son raramente puestas en evidencia de manera simultánea en una sola situación (sobre todo si son situaciones prototípicas). La fragmentación disciplinar de los currículos tradicionales induce en los alumnos la construcción de estas concepciones alternativas logadas a cada contexto particular; este fenómeno ocurre porque ellos no encuentran situaciones específicas en las que puedan expresar los razonamientos correspondientes y vincularlos.

4. La ingeniería didáctica

Para alcanzar el objetivo buscado, se propone diseñar una secuencia de aprendizaje siguiendo una metodología que permite medir el impacto de las acciones didácticas sin que se requiera un grupo piloto de tamaño importante. Esta metodología se inscribe en el marco teórico de la ingeniería didáctica: “ El término ingeniería didáctica designa un conjunto de secuencias de clase concebidas, organizadas y articuladas en el tiempo de forma coherente por un profesor-ingeniero para desarrollar un proyecto de aprendizaje de un contenido dado por parte de un grupo concreto de alumnos” (Artigue *et al.*, 1996). Concretamente, el proceso de la ingeniería didáctica consta de cuatro fases:

1. Análisis preliminares que incluyen dimensiones epistemológicas, cognitivas, didácticas y pedagógicas.
2. Concepción y análisis *a priori* de las situaciones didácticas que incluye formulación de hipótesis locales que se validan gracias al análisis *a posteriori*.
3. Experimentación
4. Análisis *a posteriori* y evaluación.

En el última parte del apartado anterior, se presentan los aspectos cognitivos individuales del aprendizaje, pero para poner en contexto los aspectos vinculados con la acción del docente y del grupo de clase se requirió un marco teórico más largo. Este artículo se sitúa además en el marco teórico del “constructivismo social” (Vygotsky, 1978) que propone la adquisición individual del conocimiento a través de las interacciones con los otros (Doise et al., 1981).

Según de Hosson (2011), las situaciones de aprendizaje propuestas a los estudiantes deben hacer emerger sus puntos de vista de manera que “los intercambios interpersonales pueden (*sic*) llevar a algunos avances cognitivos cuando el estudiante se enfrenta a otros puntos de vista distintos al suyo, es decir cuando el conflicto socio-cognitivo se produce durante la interacción”

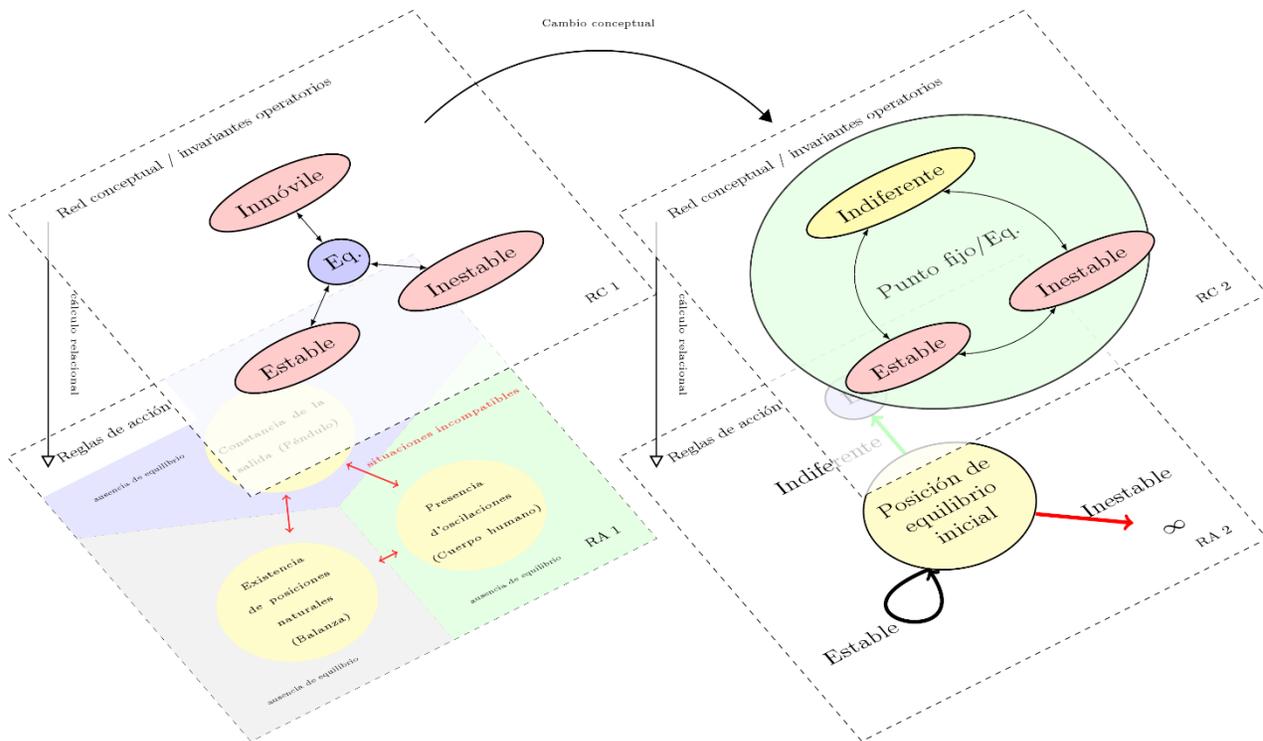


Figura 2. Modelización del cambio conceptual propuesto según un enfoque acerca de la teoría de los campos conceptuales (Vergnaud, G.): concepción del equilibrio.

La heterogeneidad de las opiniones acerca de un problema está asegurada por una elección cuidadosa de la situación y por el estudio de las concepciones de los estudiantes, como se indicó en el párrafo precedente.

La idea principal consiste en llevar a los alumnos a hacer explícito el razonamiento que los conduce a responder de una cierta forma. Esto permite comenzar el cambio conceptual esperado. Además, este proceso requiere que se defina bien la concepción deseada, hacia la cual se busca llevar a los estudiantes (en el plano RC 2 de la figura 2).

Para eso se debe proponer una definición del equilibrio y de la estabilidad que permita vincular todos los aspectos de estos conceptos en cada disciplina: la noción de *sistema* utilizada en esta comunicación es la de Von Bertalanffy (1969), que es aplicable a varias disciplinas. Así, un *sistema* es un objeto o un grupo de objetos físicos reales o simbólicos (un modelo) para el cual se conocen varias relaciones (matemáticas) entre algunas variables, o la totalidad de las medidas, o parámetros de interés (el estado) que permiten describir su evolución.

Un tal sistema puede ser un organismo vivo, un grupo de individuos de una población más grande (animales, empleados, una familia, etc.), relaciones financieras entre clientes y proveedores, una solución química, un objeto físico como un carro, una área del cerebro o la Tierra proveída de su atmósfera, etc. Por razones de simplificación, este conjunto puede restringirse a los sistemas cerrados (pero una extensión de la definición de equilibrio es posible para estos sistemas en el marco de la teoría general de los sistemas propuesta por Von Bertalanffy). Todos estos sistemas pueden ser modelizados de modo detallado o aproximado por un conjunto de ecuaciones diferenciales que vincula las variables que nos interesan. Algunas están consideradas como entradas que tienen impacto sobre las salidas del sistema mediando diferentes tipos de dinámicas; otras, como salidas que son las variables que se pueden medir.

Con esta definición, el equilibrio de un sistema (el estado de equilibrio) está definido por la existencia de un *punto fijo*, en el sentido matemático, para el conjunto de las ecuaciones diferenciales que describen la evolución del sistema. El comportamiento de un sistema en estado de equilibrio es independiente del tiempo en ausencia de perturbación o en ausencia de modificación de la referencia. En general, una posición de equilibrio es un punto del espacio vectorial generado por el conjunto de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema, y que puede ser un vector de una o más dimensiones (por ejemplo, en el caso del péndulo, las posiciones de equilibrio son dadas por *pares*: $(\theta, d\theta/dt) = (0 + k\pi, 0)$, para todo k entero, si θ es la medida del ángulo entre la vertical y la barra del péndulo).

En consecuencia, el comportamiento de un sistema en un estado de equilibrio es idéntico para un sistema libre o controlado. En efecto, es un estado estacionario (*ie*, independiente del tiempo). Esto no quiere decir, sin embargo, que todas las variables del sistema completo deban ser constantes o nulas; por ejemplo, si el interés es la velocidad de un vehículo, el sistema que nos interesa estará en un estado de equilibrio si su velocidad es constante, mientras que la posición del vehículo - su abscisa - será una función creciente del tiempo (*ie*, no constante).

Así pues, frente a un sistema cualquiera en una cierta posición (en el espacio de estado), hay dos formas que permiten detectar si éste está en equilibrio:

- Encontrar el o los puntos fijos de las ecuaciones (de manera explícita o no) que lo describen
- Observar una variable de interés y esperar

El primer método, que se puede calificar de *a priori*, se aplica en todas las disciplinas (mecánica, química, térmica, etc.) y utiliza criterios de cálculo que los alumnos dominan relativamente bien en los ejercicios de aplicación para los cuales fueron entrenados. Sin embargo, sus niveles de dominio de estos criterios son variables, pues dependen de la disciplina y de la distancia entre la situación propuesta y la situación usual. El segundo método pone en evidencia la influencia del tiempo en la caracterización del equilibrio. Este enfoque, que se puede calificar de *a posteriori*, es utilizable sólo si se dispone de registros de ciertas variables del sistema, como vídeos o fotos fechadas de éste. Sin embargo, aunque siendo poco mencionado espontáneamente por la mayoría de los estudiantes, este enfoque coincide mejor con el concepto de

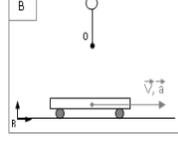
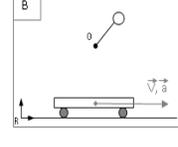
equilibrio y permite caracterizar un estado de equilibrio en todas las disciplinas. Por eso, la secuencia de aprendizaje propuesta va a basarse en esta definición.

Además, el concepto de estabilidad se puede definir de manera global a través de una definición matemática vinculada a la del equilibrio, que se puede deducir de la definición propuesta por Lyapunov (1892): Un punto de equilibrio es asintóticamente estable si todas las soluciones que se inician en las cercanías del punto de equilibrio no sólo permanecen en las cercanías del este punto (caso de equilibrio estable para sistemas controlados o indiferente en sistemas libres), sino que además tienden hacia el equilibrio a medida que el tiempo se aproxima a infinito. De otro modo, el punto de equilibrio es inestable.

Entonces, estas definiciones permiten diseñar la red conceptual objetivo como la que se presenta en el plano RC 2 de la figura 2, e inferir las reglas de acción que los estudiante deberían seguir (en el plano RA 2).

La primera acción de la secuencia de enseñanza comienza a partir de situaciones prototípicas de dos clases de situaciones del plano RC 1 y consiste en preguntar a los estudiantes si estos sistemas están en equilibrio o no, sin efectuar cálculos y sin acciones directas sobre estos sistemas. Por ejemplo, dos situaciones con una balanza de tipo egipcia y de un cuerpo humano (tablas 1).

Tabla 1. Situaciones de equilibrio “balanzas”, “cuerpo humano” y péndulo invertido.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
						
¿En equilibrio? si/no						

La primera hipótesis (H1) del análisis *a priori* consiste en la posibilidad de dividir la clase en cuatro grupos de estudiantes, según los razonamientos que corresponden a las concepciones que fueron identificadas en la parte precedente: los que responden “sí” en el caso 2 de la situación “balanza”, los que responden “no” (en un estudio previo del sistema “balanza”, en el caso 1 no se presentaron dificultades en las encuestas realizadas, mientras que para el caso 2 se obtiene más o menos el 75% de respuestas incorrectas), los que responden “sí” para el caso 4 y los que responden “no” (se espera que en el caso 3 no haya ningún problema). La hipótesis (H1) se verifica si se observa una repartición de los estudiantes de la clase como está previsto (es el indicador R1).

A través de un debate de aula, los estudiantes deben explicitar por qué respondieron “sí” o “no” a cada caso y cuáles son sus definiciones del equilibrio. Deben observar que estas definiciones comparten los casos en grupos disyuntos. Después, el docente les pide ponerse de acuerdo sobre una definición común del equilibrio que permita reunir todos los casos, porque son todos casos de equilibrio.

La segunda hipótesis (H2) es que esta acción del docente va a empezar un proceso de cambio conceptual que permitirá una aproximación entre esas dos clases de situaciones. Se verifica entonces (indicador R2) si los estudiantes logran ponerse de acuerdo sobre una primera definición estática del equilibrio como “si no hay movimiento, el sistema está en equilibrio” (esta definición corresponde al tercer grupo de situaciones del plano RA1). Esta definición no está de acuerdo con la física y tampoco permite tener en cuenta el comportamiento de los sistemas dinámicos en todos los casos (por ejemplo, para el caso 6 de la tabla 1).

La segunda parte de la secuencia consiste en introducir un nuevo sistema que corresponde a un péndulo invertido sobre un soporte móvil que se desplaza para mantener el equilibrio. Este es claramente un sistema controlado, con algunas características similares al equilibrio del cuerpo humano de pie (eso no es generalmente tomado en consideración por los alumnos). Este nuevo sistema va a conducir a los alumnos a estudiar y definir la noción de sistema y de control (pero de manera cualitativa); además los motivará a la búsqueda de una nueva definición del equilibrio que permita reunir los casos de equilibrio del péndulo invertido cuando el móvil se desplaza con respecto al suelo.

La tercera hipótesis (H3) corresponde al momento en el que el docente promueve el cambio conceptual que ha comenzado en la parte precedente. Esto va a conducir a los estudiantes a la integración de todos los casos de equilibrio vistos. Se verifica cuando los alumnos van a definir el equilibrio como un estado estacionario (con respecto de la inclinación del péndulo) que permite definir el equilibrio del péndulo en caso de movimiento rectilíneo y uniforme y de movimiento uniformemente acelerado, y que está de acuerdo con los casos previstos (el indicador R3).

La validación de esa ingeniería didáctica se logra a través de la validación de cada una de las tres hipótesis (H), las cuales se obtienen a través de los indicadores (R) durante el análisis *a posteriori*.

La secuencia de enseñanza se continúa con la investigación de varios sistemas (poleas, cohete, sistemas térmicos, sistema Lotka-Volterra presas/predadores, equilibrios químicos y regulación de nivel de depósito) con el estudio de las ecuaciones de evolución, la estabilidad y manipulaciones experimentales.

5. Conclusión

Desde un punto de vista pedagógico, esta comunicación presenta una propuesta para el desarrollo de un tipo de secuencia de enseñanza que puede llegar a ser innovadora, con base en la aproximación de la teoría general de los sistemas, que es una aproximación moderna (en términos de pedagogía) pero poco utilizada en los cursos clásicos de introducción a la automática. Esta aproximación podría permitir abordar estos conceptos de la teoría del control antes del nivel universitario, por ejemplo cuando se habla de equilibrio químico, mecánico o térmico en el colegio, ya que las concepciones (erróneas o no) de los alumnos se construyen desde la primaria sin tener que recurrir a objetos matemáticos más complejos.

En cuanto a los aspectos de investigación en educación, esta metodología de diseño de secuencias de aprendizaje se adapta en general también al colegio, pero su utilización en el nivel universitario en varias disciplinas parecería muy prometedora, como se puede constatar en matemáticas (Robert, 1982). En efecto, la ingeniería didáctica es una aproximación rigurosa con un desarrollo sistemático completo y basada en marcos teóricos sólidos.

6. Referencias

Artículos de revista

- Albanese, A., Cesar, M., Neves, D., & Vicentini, M. (1998). Students' ideas about equilibrium, friction and dissipation. *Acta Scientiarum*, 20(4), 461–472.

- Ausubel, D. P. (1969). A cognitive theory of school learning. *Psychology in the Schools*, 6(4), 331–335.
- de Hosson, C. (2011). Una controversia histórica al servicio de una situación de aprendizaje : una reconstrucción didáctica basada en *Dialogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* de Galileo. *Enseñanza*, 29(1), 115–126.
- Gunstone, R. F. (1987). Student understanding in mechanics: A large population survey. *American Journal of Physics*, 55(8), 691–696.
- Lyapunov, A. M. (1892). The general problem of the stability of motion. *International Journal of Control*, 55(3), 531–534.
- Newcomer, L. J., & Steif, S. P. (2008). Student Thinking about Static Equilibrium: Insights from Written Explanations to a Concept Question. *Journal of Engineering Education*, 481–490.
- Ortiz, L. G., Heron, P. R. L., & Shaffer, P. S. (2005). Student understanding of static equilibrium: Predicting and accounting for balancing. *American Journal of Physics*, 73(6), 545.
- Palmer, D. H. (2001). Investigating the Relationship Between Students' Multiple Conceptions of Action and Reaction in Cases of Static Equilibrium. *Research in Science and Technical Education*, 19(2).
- Posner Strike, K. A. , Hewson, P. W. , Gertzog, W. A., G. J. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change, 66(2), 211–227.
- Robert A. (1982). L'acquisition de la notion de convergence des suites numériques dans l'enseignement supérieur, *Recherches en didactique des mathématiques*, 3 (3), 307-341.
- Vergnaud Halbwachs, F. , Rouchier, A., G. (1978). STRUCTURE DE LA MATIERE ENSEIGNEE , HISTOIRE DES SCIENCES ET DEVELOPPEMENT CONCEPTUEL CHEZ L ' ELEVE. *Revue Française de Pédagogie*, 45, 7–15.
- Vigotsky, L. (1978). Interaction between learning and development. *Mind and Society* (Harvard Un., pp. 79–91).

Libros

- Artigue, M. (1996). Ingénierie Didactique. In J. Brun (Ed.), *Didactique des mathématiques* (p. 243).
- Doise, M., Mugny, G. (1981). Le développement social de l'intelligence, InterEdition, Paris.
- Doyle, J., Francis, B., & Tannenbaum, A. (1990). *Feedback Control Theory* (p. 3). Macmillan Publishing Company.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory* (Georges Br., p. 278).

Memorias de congresos

- Tamayo, F. J., Canu, M., & Duque, M. (2012). Didactic engineering applied to control system learning: equilibrium and stability concepts in the ball and beam experiment. *Active Learning in Engineering Education*.

Sobre los autores

- **Michaël Canu**, Asistente pedagógico, Máster en Automática y Didáctica de las ciencias, estudiante de doctorado de Universidad de Los Andes y de Universidad Paris Diderot – Paris 7. m.canu134@uniandes.edu.co

- **Cécile de Hosson**, Profesora, Doctora en Didáctica de las ciencias de universidad Paris Diderot – Paris 7. cecile.dehosson@univ-paris-diderot.fr
 - **Mauricio Duque**, Profesor, I.E. Ingeniería eléctrica, Universidad de los Andes, Doctor en Ingeniería de Institut National Polytechnique de Grenoble. maduque@uniandes.edu.co
-

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería y de la International Federation of Engineering Education Societies

Copyright © 2013 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)