Los Mímicos Computacionales: Una Herramienta Docente para la Enseñanza de la Ingeniería de Control

Patete, Ana / Rodríguez-Millán, Jesús
Universidad de Los Andes / apatete@ula.ve / jrmillan@ula.ve

Finalizado: Mérida, 2010-10-10 / Revisado: 2011-04-28 / Aceptado: 2011-05-30

Resumen

En este trabajo se utilizan las capacidades gráficas y de animación de Mathematica® para desarrollar la librería de mímicos computacionales ControlAnimation, una herramienta docente para dar apoyar la enseñanza del análisis y diseño de sistemas de control. Dicha librería contiene diversos tipos de sistemas, en especial sistemas de péndulos, con fines didácticos. Desde el punto de vista técnico, el desarrollo de los mímicos puede ser pensado como el desarrollo de una película, cada uno de cuyos cuadros describe fielmente los estados del sistema en un instante determinado. Al igual que las películas, los mímicos computacionales son sistemas dinámicos a tiempo-discreto que el espectador percibe como sistemas dinámicos a tiempo-continuo gracias a sus capacidades cerebrales de interpolación de imágenes. La utilización de mímicos computacionales con fines docentes pretende contribuir a cerrar la brecha existente entre el enfoque numérico analítico tradicional y la obtención de un conocimiento global, integral e intuitivo de la dinámica de los sistemas de control.

***Palabras clave**: gráficos por computadora, Mathematica®, mímicos, sistemas de control.*

***

Abstract

COMPUTATIONAL MIMICS: A TEACHING TOOL FOR CONTROL ENGINEERING

In this work, the integrated symbolic, graphic, and numeric capability of Mathematics was used to develop the computational mimic's library ControlAnimation, an educational tool to support the teaching of control system analysis and design. This library contains several types of systems, particularly pendulum systems for didactic purposes. From a technical perspective, developing a computational mimic might be compared to shooting a film, where every single frame faithfully describes the state of the system at a precise instant. Just like films, computational mimics are discrete-time dynamical systems that spectators perceive as a continuous-time dynamical system as a consequence of their brain- image interpolation capabilities. Using computational mimics for teaching purposes aims at contributing to close the gap between the traditional numeric analytical approach and the search for a global, integrated and intuitive understanding of control system dynamics.

***Key words**: computer graphics, Mathematica®, mimics, control systems.*

***

Résumé

LES MIMICS INFORMATIQUES: UN OUTIL D´ÉNSEIGNEMENT POUR L´INGÉNIERIE DU CONTRÔLE

Ce travail porte sur le développement d´une bibliothèque de mimics computationnelles, appelé ControlAnimation. Celle-ci a été conçue pour appuyer l´enseignement des techniques d´analyse et de conception des systèmes de contrôle, en utilisant les capacités graphiques et d´animation du logiciel Mathematica®. Cette bibliothèque comprend plusieurs modèles mathématiques de systèmes à des fins éducatives, en particulier des modèles à pendules, Du point de vue technique, le développement des mimics peut être comparée au montage d´un film, dont chaque image décrit chaque état d´un système à un instant spécifique. Comme les films, les mimics sont des systèmes en temps discret que le spectateur perçoit comme des systèmes continus grâce à la capacité du cerveau humain à fusionner des images successives. L´utilisation des mimics à des fins éducatives vise à éliminer l'écart entre l´approche numérique analytique conventionnelle et l´obtention de connaissances globales, intégrées et intuitives sur la dynamique des systèmes de contrôle-commande.

***Mots-clés**: graphiques par ordinateur, Mathematica®, mimics, systèmes de contrôle.*

1. Introducción

El paradigma docente imperante mayoritariamente en las Facultades de Ingeniería enfatiza el estudio de los aspectos algebraizables, algoritmizables y computables (en un número finito de pasos) de los problemas y relega a un segundo plano los aspectos intuitivos, geométricos, integradores y sintetizadores de los mismos. Una consecuencia de este paradigma docente es que al momento de recibirse la gran mayoría de los nóveles ingenieros están equipados, por formación, con poderosas herramientas para realizar complejos cálculos cuyos resultados, en muchos casos, no pueden luego comprender o interpretar a cabalidad porque carecen de la visión intuitiva global de la geometría, la física y la dinámica de los fenómenos y sistemas que estudian. El antagonismo *calcular* vs *comprender* no es exclusivo de la ingeniería y por el contrario se manifiesta en distintas disciplinas con diversos ropajes: *cuantitativo* vs *cualitativo*, *álgebra* vs *geometría*, *hemisferio izquierdo* vs *hemisferio derecho*, etc.

Nadie en sano juicio cuestiona que la praxis rutinaria de la ingeniería se traduce en calcular algorítmica y eficientemente diversas clases de objetos. Tampoco los autores de este trabajo pretenden hacerlo. Lo que se pretende poner de relieve en este artículo, sin embargo, es que la adquisición de una comprensión profunda de la ingeniería supone alcanzar un conocimiento de la geometría y la física de los problemas, y no sólo la sustitución de un algoritmo de cálculo por otro más eficiente que permita reducir el tiempo de cómputo de un resultado. Este conocimiento profundo e intuitivo por lo general sólo se alcanza luego de años de trabajo y reflexión, como un subproducto de la experiencia en investigación, docencia y desarrollo, y no como consecuencia de un entrenamiento sistemático orientado al establecimiento de los necesarios puentes entre cómputo e interpretación física, álgebra y geometría, análisis y síntesis, hemisferio izquierdo y hemisferio derecho.

La universalización y omnipresencia de los computadores digitales indudablemente ha reforzado el paradigma docente numérico-analítico tradicional de las facultades de ingeniería. Sin embargo, la incorporación y progresiva difusión de las capacidades simbólico-gráficas de las computadoras digitales permite avizorar un futuro docente dual, donde se disponga de un poder de cálculo tan grande como se pueda costear y simultáneamente herramientas simbólico-gráficas que permitan traducir resultados en imágenes que alimenten y exploten las capacidades de razonamiento y comprensión visual característico del cerebro humano, para tender los necesarios puentes entre el calcular y el comprender, entre el álgebra y la geometría (Rodríguez-Millán, 2007).

En el contexto concreto de la ingeniería de control las dinámicas de los sistemas se describen tradicionalmente mediante simulaciones temporales, es decir, mediante las gráficas de funciones que rigen la evolución temporal de los estados, salidas y controles vs. tiempo. Esta forma analítica de hacer tiene la ventaja de permitir al usuario efectuar un estudio detallado e independiente de cada variable individual de un sistema, pero con frecuencia no permite alcanzar una visión integrada del comportamiento físico del mismo. Esta dualidad análisis-síntesis es particularmente notable en sistemas de orden alto, donde disponer de gráficas detalladas de las evoluciones temporales de los estados del sistema no necesariamente le permiten al usuario imaginar las interacciones entre ellas y menos su dinámica física simultánea. Una forma de facilitar la visualización del comportamiento físico de un sistema y su dependencia respecto a parámetros, condiciones iniciales y controles consiste en utilizar técnicas de animación gráfica computacional para simular las dinámicas de los sistemas mediante mímicos computacionales en vez de las tradicionales simulaciones numéricas. En este trabajo se discuten algunos de los principios de la construcción de mímicos computacionales de sistemas dinámicos de control. Estos mímicos son luego utilizados como herramientas de enseñanza para ilustrar la acción de diferentes políticas de control sobre los sistemas físicos comúnmente analizados en la ingeniería de control.

Desde el punto de vista de las aplicaciones docentes cabe mencionar que la visualización mediante mímicos computacionales permitirían expandir, mejorar e incrementar la difusión de ideas complejas porque perceptualmente los mímicos virtuales están considerablemente más cerca de la física de los sistemas que las correspondientes simulaciones numéricas, lo cual permite describir ideas complejas apoyándose en la intuición física y geométrica del auditórium en vez de su formación técnica matemática.

En los últimos años se ha venido incrementando el uso de imágenes, videos, películas y mímicos computacionales en la enseñanza de conceptos físicos, matemáticos, mecánicos y de computación. En el campo de la ingeniería de sistemas de control, el uso del paquete computacional Matlab® (Ogata, 1998, Pérez 2007, Matlab®, 2004) es una suerte de herramienta universal de cálculo numérico y simulación, pero sus capacidades simbólicas son muy limitadas. Otros paquetes como Maple (Maple 10, 2005) y Mathematica® (Wolfran, 1999), sin embargo, son capaces de realizar cálculos simbólicos complejos y pesados. Mathematica®, además de ser un paquete computacional integrado simbólico, gráfico, numérico, permite la programación de nuevas funciones y librerías que son fáciles de cargar y utilizar en el paquete.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el paquete computacional Mathematica**®**, usado para el desarrollo de los mímicos en este trabajo; la metodología, por su parte, se describe en la sección 3. La librería ControlAnimation, desarrollada (en Mathematica**®**) con fines educativos y para el análisis y prueba de leyes de control para sistemas físicos, se presenta en la sección 4. La sección 5 discute las ventajas del uso de los mímicos computacionales como instrumentos docentes, especialmente en el área de la ingeniería de control. En la sección 6 se exponen las conclusiones.

2. El paquete computacional Mathematica®

Mathematica® es un paquete computacional integrado simbólico, gráfico, numérico diseñado por Wolfram Research, Inc. (1999), para ser usado tanto como una herramienta de cálculo (numérico y/o simbólico) como un lenguaje de programación.

El análisis y diseño de sistemas de control, tanto lineales como no lineales, requieren en la mayoría de los casos del uso de distintas herramientas computacionales especializadas en la ejecución de tareas específicas: Maple para la manipulación algebraica, Simulink® (2004) para la construcción de diagramas de bloques y Matlab® para las simulaciones y el cálculo numérico. Tal diversidad de herramientas exige, entre otras cosas, el diseño de las interfaces adecuadas para la transferencia de los datos entre dichas aplicaciones, lo que podría comprometer la confiabilidad del proceso en su conjunto. Utilizar Mathematica® elimina la necesidad de interfaces para constituir una plataforma computacional integrada simbólico-gráfica-numérica, particularmente útil en la implementación de estrategias gráficas para la generación de imágenes por un computador.

Un usuario que trabaje bajo los sistemas operativos Microsoft Windows, Macintosh o cualquier sistema operativo basado en Windows que utilice como interfaz los notebooks (espacios de trabajo) en Mathematica®, puede iniciar cualquier animación seleccionando un grupo de imágenes y ejecutándolas como un único objeto con un *click*.

Otra de las grandes ventajas de Mathematica® es su doble capacidad para efectuar cálculos simbólicos o numéricos, lo que le permite ejecutar fórmulas tanto algebraicas como numéricas. Además, Mathematica® posee mayor precisión que otros paquetes computacionales usados para el cálculo numérico.

La habilidad de visualizar efectos dinámicos con una secuencia de gráficas animadas es generalmente muy instructiva. Una colección muy útil de rutinas animadas elementales es suministrada por Mathematica® en el paquete *Graphics`Animation`*; equipando con herramientas para construir secuencias de imágenes gráficas que pueden ser mostradas bajo diferentes plataformas computacionales. Adicionalmente, el paquete Mathematica® proporciona un gran número de funciones predeterminadas para generar diversos tipos de figuras particulares, en términos de las cuales se pueden construir imágenes complejas que representen la realidad de los sistemas de control en estudio.

3. Metodología: los mímicos en Mathematica®

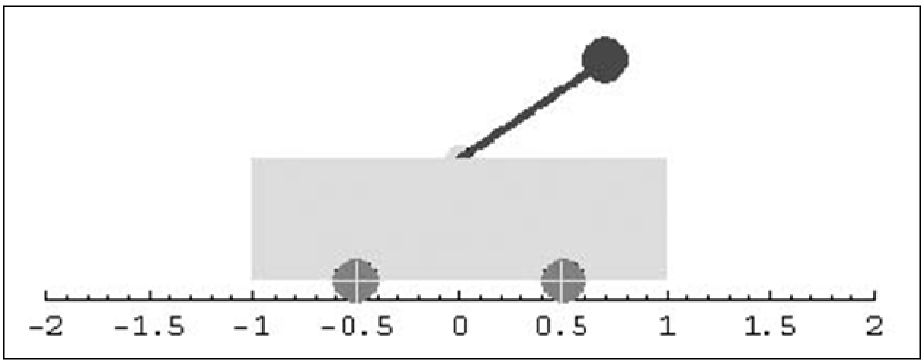
Un mímico computacional puede ser pensado y asimilado básicamente a una película cuyos cuadros describen estados del proceso estudiado en instantes periódicos de tiempo $t = k\,T_0$, donde $k \in N$ y $T_0 \in \mathbb{R}^n$ (Patete, 2002). Así, aun cuando el proceso físico real en estudio sea un sistema dinámico a tiempo-continuo (Rodríguez, 1997), matemáticamente hablando los mímicos son sistemas dinámicos a tiempo-discreto o sistemas muestreados (Isermann, 1989) cuyos estados son descritos mediante imágenes simplificadas que mimetizan el objeto físico estudiado. La ilusión de continuidad temporal de la dinámica del mímico computacional proviene, al igual que en la películas de cine, del proceso de filtraje e interpolación que realiza el cerebro del espectador. Como es de suponerse, en los sistemas lineales el tiempo de muestreo T_0 debe al menos satisfacer el teorema de muestreo de Shannon (Isermann, 1989, Oppenheim, 1998) para que la reconstrucción de la dinámica continua a partir de la dinámica discreta refleje la física del sistema en estudio.

En el desarrollo de un mímico computacional de un sistema físico conviene, por lo general, efectuar un despiece detallado del sistema con el objeto de descomponerlo en sus elementos gráficos constitutivos elementales. Así, por ejemplo, el péndulo invertido montado en un carrito mostrado en la Figura 1 podría ser descompuesto en términos de puntos de diferente tamaño (la masa del péndulo invertido y las ruedas del carrito), segmentos de rectas (el brazo del péndulo, el piso sobre el cual se mueve el carrito), rectángulos (el cuerpo del carrito), etc. En la medida de lo posible los elementos geométricos del despiece deberían coincidir con primitivas gráficas de Mathematica®, en nuestro caso particular, o del paquete computacional utilizado como ambiente de desarrollo del mímico.

Uno de los instrumentos más potentes con que cuenta Mathematica® es el concepto matemático de función, que permite no sólo definir, graficar y operar con funciones matemáticas en el sentido habitual, sino también definir todo tipo de objetos parametrizados cuyas características y propiedades pueden ser modificadas mediante variaciones de sus variables independientes. Las primitivas gráficas proporcionadas por Mathematica® (puntos, líneas, círculos, rectángulos, poligonales, etc.) son casos particulares de funciones predefinidas en Mathematica® que simplifican enormemente la construcción de objetos gráficos complejos.

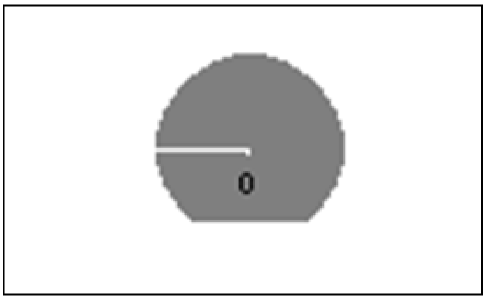
Existen múltiples formas de generar objetos gráficos complejos en Mathematica®, entre las cuales destacaremos la superposición de gráficos y la unión de funciones. En la superposición de gráficos, como su nombre lo indica, se intercalan gráficos independientes. Por ejemplo para construir el indicador de velocidad (o velocímetro) para el péndulo invertido montado en un carrito mostrado en la Figura 2, se dibuja un punto de gran tamaño (en este caso de color gris) y un rectángulo de color blanco (que es el mismo color del fondo), ubicando el rectángulo de tal manera que cubra un 15% del área inferior del punto. Al superponer

Figura 1
Péndulo invertido montado en un carrito diseñado en Mathematica®



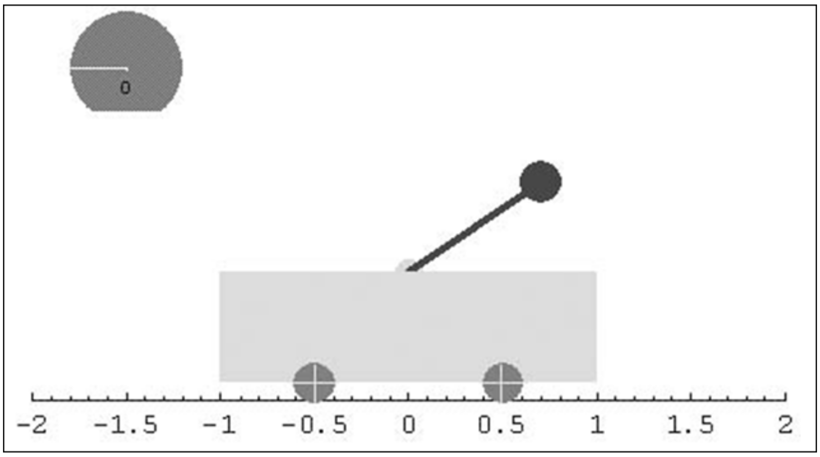
Fuente: proceso de la investigación

Figura 2
Velocímetro diseñado en Mathematica®



Fuente: proceso de la investigación

Figura 3
Péndulo invertido montado en un carrito con velocímetro diseñado en Mathematica®



Fuente: proceso de la investigación

ambos elementos se obtiene el velocímetro como se muestra en la Figura 2. Luego se añaden los demás detalles (la aguja del velocímetro a través de una línea y el indicador numérico de velocidad mediante una variable que muestra el valor de la velocidad en ese instante). Otra forma de resolver el problema es definir una nueva función que describiría el péndulo invertido montado en un carrito con velocímetro, que podría obtenerse invocando la función péndulo invertido montado en un carrito (Figura 1) y la función velocímetro (Figura 2), definidas y construidas previamente, obteniéndose así la gráfica mostrada en la Figura 3.

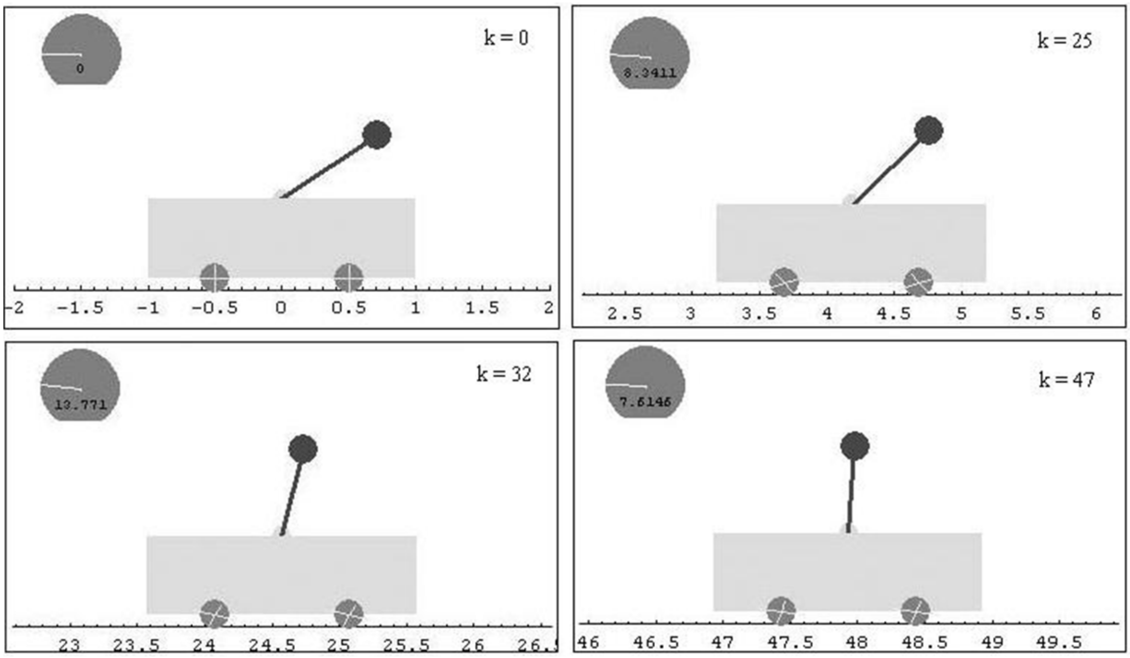
4. Los mímicos como sistemas dinámicos a tiempo discreto

Disponer de una herramienta computacional para visualizar los efectos dinámicos globales e integrados a través de una secuencia gráfica permite utilizar el pensamiento visual-geométrico humano y facilita el acercamiento del estudiante a la física de los problemas. El efecto de movimiento es producido por la generación y visualización de una secuencia de cuadros a una determinada velocidad. Cada cuadro que conforma el movimiento del mímico corresponde a un punto preciso y correcto de la trayectoria que describe la dinámica del sistema control (Patete, 2002). En Mathematica®, las animaciones son representadas por un arreglo de imágenes dispuestas en un orden predeterminado.

T_0 denota el período de muestreo (Isermann 1989, Oppenheim 1998), es decir T_0 indica el intervalo de tiempo que transcurre entre una muestra (imagen) y la próxima, espacio que debe cumplir con el teorema de muestreo de Shannon (Isermann, 1989, Oppenheim, 1998). La discretización puede ser calculada a través de los diferentes métodos estándares (discretización aproximada, exacta o truncada) estudiados en la teoría de control discreto (Patete 2002, Isermann 1989) o a través de los métodos no estándares: discretización de Euler, Euler-Picard o Euler-Taylor-Picard (Patete 2005; Rodríguez 2003, 2005a, 2005c). Así, cada cuadro representa los estados del sistema en los instantes

Figura 4

Péndulo invertido montado en un carrito para valores de $k=0$ (condición de partida o inicial de la posición del carro y el péndulo), $k=25$, $k=32$ y $k=47$ para un período de muestreo, $T_0 = 0.1seg$



Fuente: proceso de la investigación

$t = kT_0$. La Figura 4 muestra una secuencia de imágenes de la animación del péndulo invertido montado en un carrito, tomadas en algunos instantes (valores de k).

Para la animación, se grafican todas la imágenes en el intervalo $k = [0, t_{sim}]$, donde t_{sim} es el tiempo final de la simulación y $k = 0,1,2,3,4,...,t_{sim}$. Agrupando las imágenes y corriéndolas como un objeto único en el notebook (espacio de trabajo de Mathematica®) se obtiene la animación del sistema para las especificaciones dadas.

5. La librería ControlAnimation para Mathematica®

La Librería *ControlAnimation* (Patete 2002, 2005) es una herramienta computacional integrada simbólico-gráfica-numérica, que permite visualizar tanto las dinámicas en lazo abierto como las dinámicas controladas de algunos sistemas físicos no lineales mediante mímicos construidos usando las capacidades de animación gráfica del paquete computacional Matemática®.

La librería *ControlAnimation* cuenta, hasta los momentos, con las funciones generadoras de mímicos mostradas en la Cuadro 1.

6. Los mímicos computaciones como medio de enseñanza para la ingeniería de control

La visualización de las dinámicas de los sistemas de control a través de mímicos computacionales tiene grandes ventajas sobre las simulaciones numéricas tradicionales, ya que mentalmente ésta se encuentra mucho más cerca del comportamiento del sistema físico real bajo estudio. La visualización permite utilizar el razonamiento y la comprensión geométrica global, en contraste con la simulación numérica, componente fundamental del paradigma calculista tradicional de la ingeniería, que enfatiza el comportamiento individual de las variables del proceso.

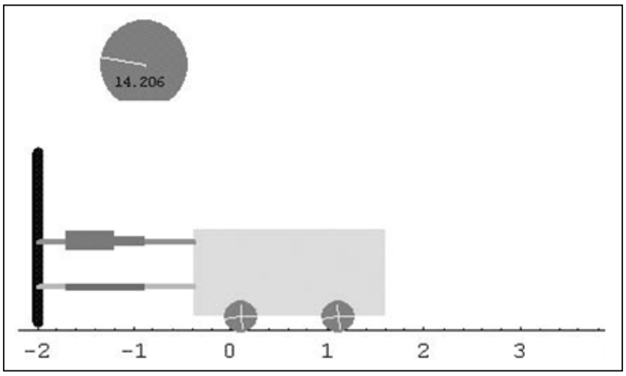
Un ejemplo muy claro de lo antes expuesto se presenta a continuación: la ecuación (1) es el modelo matemático del comportamiento dinámico del péndulo centrífugo, obtenido a través de las leyes de la mecánica newtoniana. El sistema del péndulo centrífugo es un sistema físico conocido por la mayoría de los niños, ya que sus propiedades y características son análogas al juego de la silla voladora en los carruseles. La Figura 15 muestra la simulación en tiempo discreto (simulación

Cuadro 1
Funciones de la Librería *ControlAnimation*

Función	**Descripción**	**Figura No.**
MassForce	Retorna la animación de la planta del sistema masa resorte amortiguador.	Figura 5
SimplePendulum	Retorna la animación de la planta del péndulo simple.	Figura 6
InvertedPendulumAnimation	Retorna la animación de la planta del péndulo invertido.	Figura 7
InvertedPendulumOnCarAnimation	Retorna la animación de la planta del péndulo invertido sobre un carro.	Figura 8.
InvertedPendulumOnCarAnimationForce	Retorna la animación de la planta del sistema de péndulo invertido montado sobre un carro con presencia de resortes y/o amortiguadores.	Figura 9
TwoInvertedPendulumOnCarAnimation	Retorna la animación de la planta del sistema de doble péndulo invertido montado sobre un carro.	Figura 10
DoubleInvertedPendulumOnCarAnimation	Retorna la animación de la planta del sistema de péndulo doble invertido montado sobre un carro.	Figura 11
CentrifugalPendulumAnimation	Retorna la animación de la planta del péndulo centrífugo.	Figura 12
WattGovernorAnimation	Retorna la animación de la planta del regulador centrífugo de Watt.	Figura 13.
AircraftAnimation	Retorna la animación de la planta de la aeronave.	Figura 14

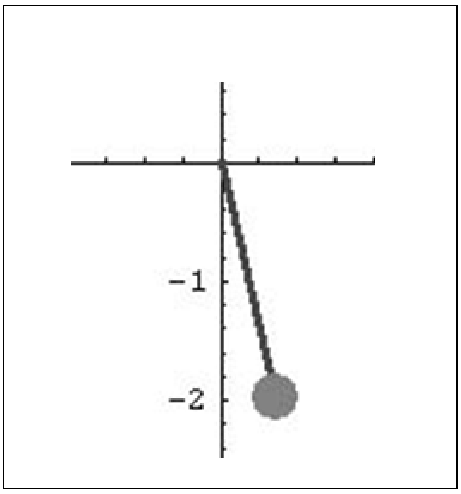
Fuente: proceso de la investigación

Figura 5
Sistema masa resorte amortiguador



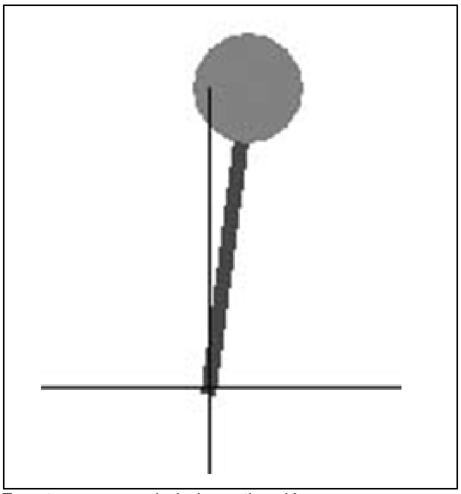
Fuente: proceso de la investigación

Figura 6
Péndulo simple



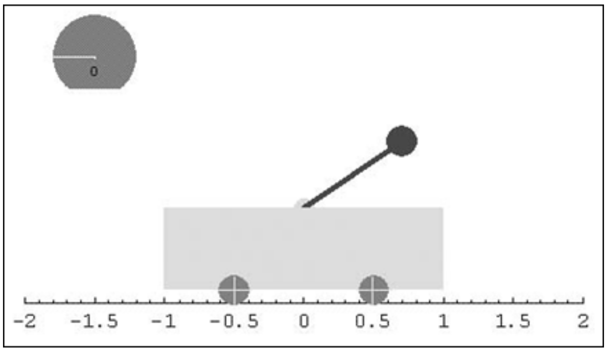
Fuente: proceso de la investigación

Figura 7
Péndulo invertido



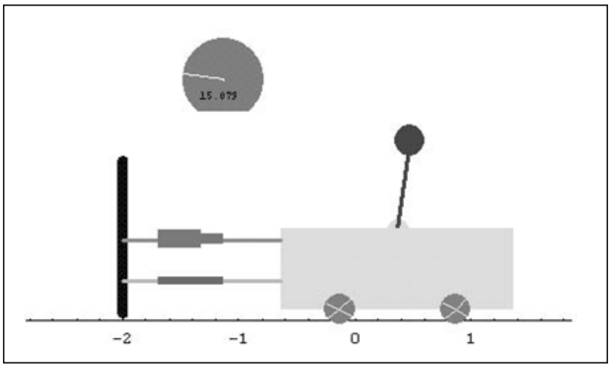
Fuente: proceso de la investigación

Figura 8
Péndulo invertido sobre un carro



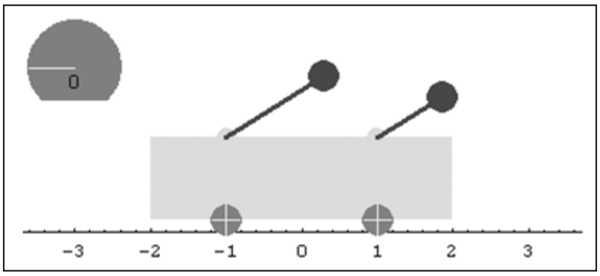
Fuente: proceso de la investigación

Figura 9
Péndulo invertido sobre un carro con presencia de resortes y/o amortiguadores



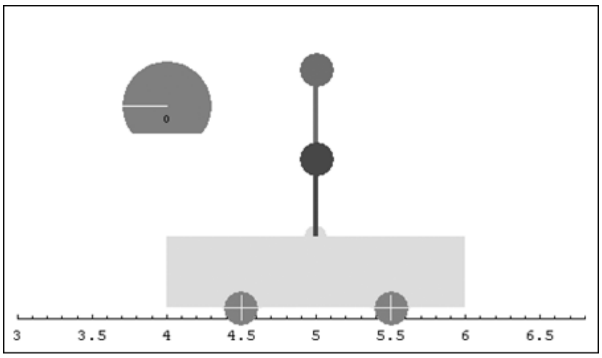
Fuente: proceso de la investigación

Figura 10
Doble péndulo invertido montado sobre un carro



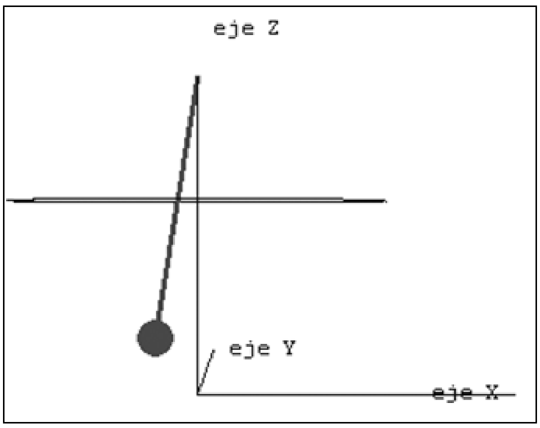
Fuente: proceso de la investigación

Figura 11
Péndulo doble invertido montado sobre un carro



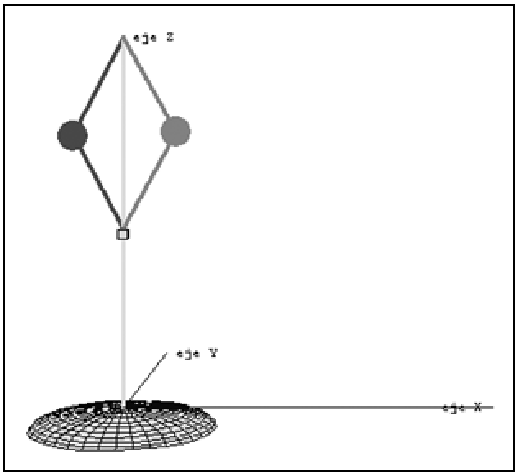
Fuente: proceso de la investigación

Figura 12
Péndulo centrífugo



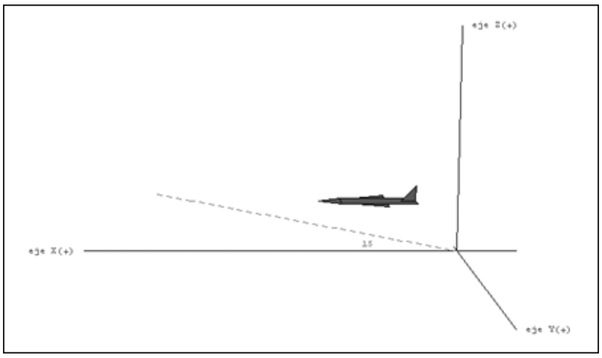
Fuente: proceso de la investigación

Figura 13
Regulador centrífugo de Watt



Fuente: proceso de la investigación

Figura 14
Aeronave



Fuente: proceso de la investigación

tradicional) del sistema y por último en la Figura 16 se muestran algunas gráficas provenientes de la animación vs. la simulación tradicional (para un instante determinado). Debido a que en este trabajo no se pretende dar una explicación matemática o física de los sistemas de control, se refiere al lector interesado en la dinámica del péndulo centrífugo y el diseño de sus controladores (Patete, 2002) o a los libros de ingeniería de control.

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{gSen(\theta)}{l} + \omega^2 Cos(\theta)Sen(\theta) - \rho\dot{\theta}$$

Si un estudiante de ingeniería de control contase solamente con las ecuaciones matemáticas para el análisis o el diseño del sistema del péndulo centrífugo, muy probablemente ni siquiera podría imaginar que el sistema físico evoluciona en $\mathbb{R}^3$ o que su trayectoria son círculos horizontales alrededor de un eje vertical de rotación.

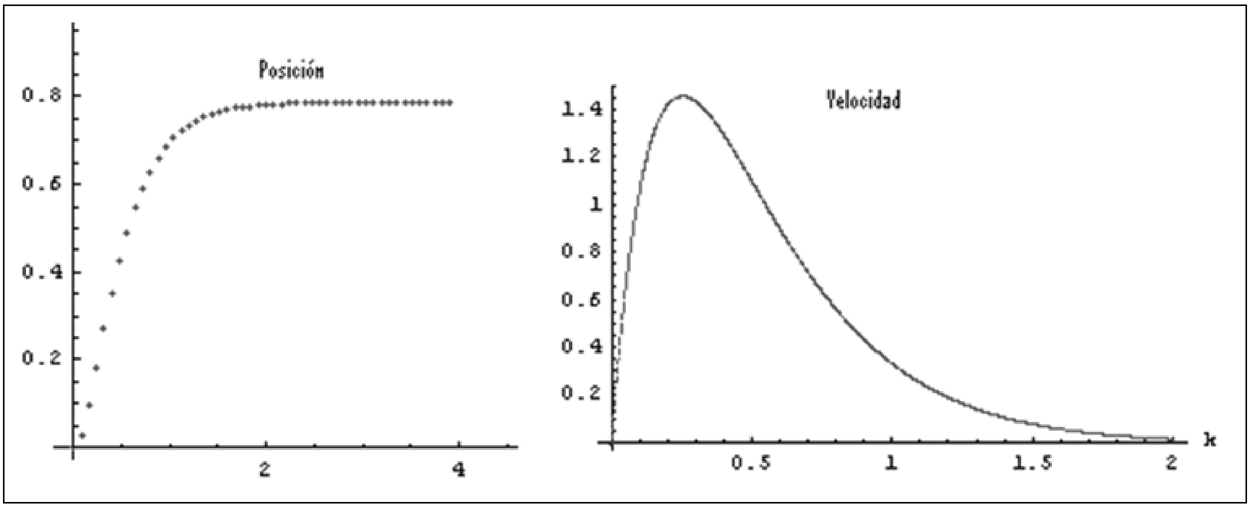
Al realizar el análisis a través de las simulaciones tradicionales, el estudiante debe graficar tanto la posición como la velocidad del mismo, como se mostró en la Figura. 15. Conectar la dinámica de ambas gráficas y asociarlas al sistema físico real no es algo sencillo y aun en este caso, en el que se tienen las simulaciones, el estudiante no es capaz de imaginar que el sistema es un objeto físico tridimensional y menos aún el sentido en que se mueve.

Con la animación, el estudiante puede comprender de manera sencilla y rápida (i) lo que está sucediendo en el sistema péndulo centrífugo (Figura. 16) y (ii) la naturaleza y razón de ser de las restricciones impuestas al sistema; por ejemplo, los valores de la posición angular θ respecto al eje vertical de rotación no pueden ser negativos, ya que la posición $\theta = 0$ indica que el péndulo se encuentra en reposo sobre el eje de rotación. Así, un valor negativo de θ indicaría que la masa del péndulo penetraría el eje de rotación del mismo, lo cual no es físicamente posible si dicho eje es rígido y no deformable.

Los mímicos desarrollados reconocen como señal de control una sucesión de números reales adecuadamente identificada, cualquiera sea el origen de dicha sucesión. Esto le permite exhibir dinámicas inducidas tanto por señales de control lineales como no lineales (Rodríguez-Millán, Patete y González, 2005b, 2007), tal como se representa en la Figura. 17.

Los sistemas estudiados en la ingeniería de control suelen ser sistemas mecánicos, químicos, neumáticos, eléctricos, ópticos, etc., con componentes sensibles y susceptibles a daños importantes si no se respetan las normas, patrones y protocolos establecidos para su correcto funcionamiento. Por ello, en una buena praxis de la ingeniería, antes de aplicar una ley de control a un sistema real, se deberían haber realizado suficientes análisis y simulaciones que permitan, más allá de cualquier duda razonable, estar seguros de que la implementación física de la ley de control no dañará al sistema, y que éste se comportará de

Figura 15
Simulación tradicional del péndulo centrífugo, para la posición y la velocidad (tiempo discreto)



Fuente: proceso de la investigación

acuerdo con lo esperado.

El estudiante de ingeniería de control, y en general un estudiante de ingeniería, es una persona curiosa que debería tener libertad de experimentar diferentes maneras de aplicar los conceptos estudiados para ampliar sus conocimientos a través de las experiencias y para desarrollar su comprensión intuitiva de la física y el comportamiento de los sistemas. En la práctica, sin embargo, por razones de diverso orden, los estudiantes no tienen acceso a diversos tipos de plantas físicas reales para experimentar sobre ellas sus leyes de control y, en el mejor de los casos, su experiencia de laboratorio se limita a trabajar con circuitos operacionales de bajo costo. La incorporación de mímicos computacionales a la docencia es un recurso para ampliar el acceso de los estudiantes de control a plantas más complejas, cuyos parámetros, características y condiciones de operación pueden ser fácilmente modificables.

7. Conclusiones

Los mímicos computacionales son sistemas virtuales capaces de mimetizar el comportamiento de sistemas físicos reales en diferentes escenarios, como por ejemplo, cambios de parámetros y condiciones iniciales y diversidad de leyes de control y/o observación.

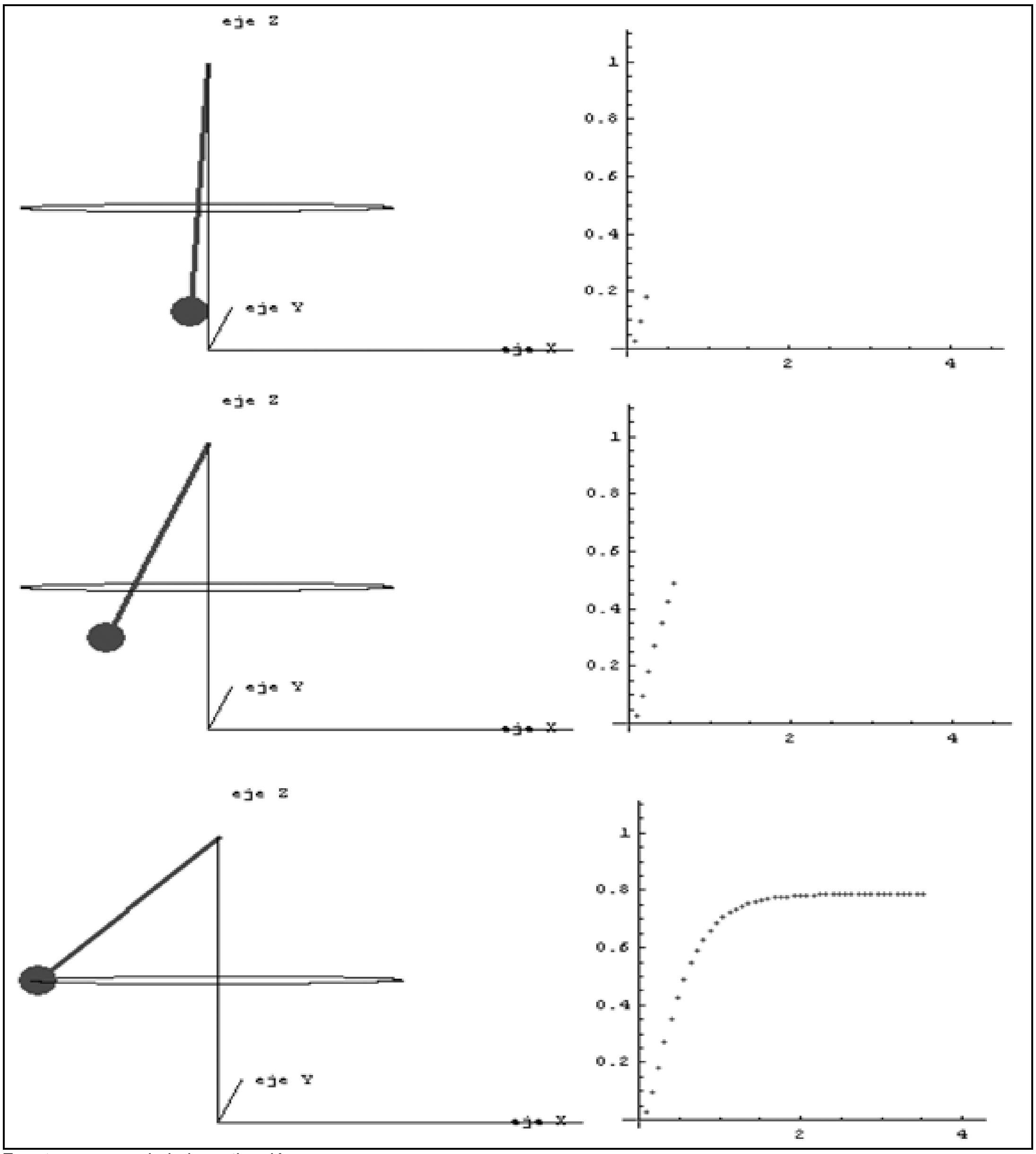
Los mímicos facilitan la adquisición de un conocimiento global, integral e intuitivo de la física y la dinámica de los sistemas porque permiten visualizar directamente cómo los cambios en parámetros y condiciones iniciales modifican su comportamiento cualitativo.

La potencialidad docente de los mímicos es enorme en tanto amplía considerablemente la capacidad de los estudiantes de ingeniería de control de tener acceso a diversos tipos de plantas, de realizar experimentos en diferentes condiciones, de reducir costos y de evitar daños en sistemas costosos por inexperiencia.

La generación de las imágenes que conforman los movimientos de los mímicos consiste en un proceso bastante pesado para los ordenadores personales, los cuales poseen limitaciones de hardware (memoria RAM principalmente). Es por ello que se debe tener en cuenta las especificaciones del ordenador en el cual se está trabajando para así determinar el número de imágenes que este puede soportar.

Los mímicos permiten visualizar el efecto de cualquier tipo de esquemas de control aplicables a los sistemas físicos reales, tales como realimentación del vector de estados, PID, atraso-adelanto, etc., sean de carácter lineal o no lineal.

Figura 16
Graficas representativas de la animación del péndulo centrífugo vs. la simulación tradicional (posición) para algunos instantes



Fuente: proceso de la investigación

Figura 17
Diagrama de bloques del sistema animado

Fuente: proceso de la investigación

Referencias

Isermann, R. (1989). *Digital Control Systems. Volume I: Fundamentals, Deterministic Control*. 2nd Revised Edition. Berlin: Springer-Verlag.

Maple 10. (2005). *User manual*. Maplesoft.

Matlab®. (2004). *The Language of Technical Computing*. Copyright The MathWork, Inc.

Ogata, K. (1998). *Problemas de Ingeniería de Control utilizando Matlab*. Madrid: Prentice Hall.

Oppenheim, A. and Willsky, A. (1998). *Señales y sistemas*. 2da edición. Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Patete, A. (2002). *Desarrollo de un mímico de un sistema de control en Mathematica.* Mérida: Universidad de Los Andes. Catalogo en Línea.

Patete, A. (2005). *Visualización de dinámicas no lineales mediante mímicos computacionales en Mathematica*. Mérida: Universidad de Los Andes. Catalogo en Línea.

Pérez (2007). *Matlab y aplicaciones en ciencias e ingeniería*. Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana.

Rodríguez-Millán, J. (1997). Sistemas dinámicos no lineales: Teoremas fundamentales. *Cuadernos de Control*, 97(1).

Rodríguez-Millán, J. and Patete, A. (2003). 3D- Simulations in Linear and Nonlinear Dynamical Control Systems through Computer Animated Mimics. Proceeding of Cast and Complexity in Biological, Physical and Engineering Systems, *Extended Abstracts, 9th International Conference on Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2003*, Las Palmas de Gran Canarias, Canary Islands. 192-195.

Rodríguez-Millán, J., Gonzalez, C. and Patete, A. (2005a). Analysis, Synthesis and Mimetization of Nonlinear Control Systems Using Mathematica. Cast and Tools for Robotics, Vehicular and Communication Systems, *Extended Abstracts, 10th International Conference on Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2005*. 316-320.

Rodríguez-Millán, J., González, C. and Patete, A. (2005b). *Improved Non-Standard Discretization Methods for Nonlinear Dynamical Control Systems. Computer Aided Systems Theory*, 608-613. I

Rodríguez-Millán, J. and González, C. (2005c). Three Mathematica Supported Proposals for the Discretization of Nonlinear Control Systems. *Nonlinear Analysis* 63, 617-628. Disponible: http://www.sciencedirect.com [Consulta: 2000, enero 13]

Rodríguez-Millán, J., Patete, A. and González, C. (2007). Picard Discretization of Nonlinear Systems: Symbolic or Numeric Implementation?. In Roberto Moreno-Diaz, Franz Pichler, Alexis Quesada-Arencibia (Editors), *Computer Aided Systems Theory*, 121-129.

Rodríguez-Millán, J. (2007). What have Computers to do with Geometric and Algebraic Kung Fu Learning?. Proceeding of Computer Aided Systems Theory, *Extended Abstracts, 11th International Conference on Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2007*, Las Palmas de Gran Canarias, Canary Islands.142-145.

Simulink® (2004). Copyright *The MathWork*, Inc.

Wolfran, S. (1999). *The Mathematica® Book*. Fourth Edition. New York: Wolfran Media/Cambridge University Press.