

Experiencias sobre la integración entre teoría y práctica en la enseñanza del control automático

❖ **AUGUSTO ZUMARRAGA** | uku@ing.unlp.edu.ar

Facultad de Ingeniería | Universidad Nacional de La Plata

CONTEXTO

Las experiencias aquí presentadas se desarrollaron principalmente en el contexto del dictado de la asignatura *Control y Guiado*, de la carrera de Ingeniería Aeronáutica.

A modo de contexto debemos mencionar que esta asignatura se ubica en el último cuatrimestre de la carrera. El cuerpo docente se compone de un profesor y un auxiliar, con una matrícula de entre 10 y 20 alumnos. La materia se dicta en ambos cuatrimestres, con dos clases semanales de 2.5hs cada una sin separación entre teoría y práctica, los días martes y viernes por la mañana.

Intentaremos primero brindar al lector un panorama de la naturaleza de los contenidos involucrados en esta materia, y luego la perspectiva pedagógica desde la cual se plantean las estrategias didácticas aquí presentadas. Con esta base pasaremos luego a la esencia de esta presentación.

INTRODUCCIÓN

El *Control Automático* es una rama de la ingeniería basada en una fuerte estructura matemática propia del análisis de la *Dinámica de Sistemas*. Podemos caracterizar al Control Automático como aquella disciplina que se enfoca en el diseño de *realimentaciones artificiales para lograr sistemas dinámicos con comportamientos deseables*.

A modo de síntesis digamos que un *sistema de control automático* (el objeto de estudio de esta disciplina) es un *piloto artificial*, aunque lo que este “piloto” deba conducir pueda tratarse de algo muy simple como la temperatura del agua de una pava eléctrica doméstica a

algo tan complejo como una nave espacial o la evolución de la economía de un País por ejemplo.

Probablemente llame la atención del lector el hecho de que la *Teoría de Control* pretenda analizar cosas tan disímiles bajo un mismo paradigma. Resulta oportuno entonces hacer notar que esto es posible mediante un proceso de abstracción y modelado matemático.

El desarrollo de un sistema de control puede pensarse en tres etapas: análisis, síntesis y verificación.

El proceso de *análisis* puede descomponerse en las siguientes actividades:

- Modelado *conceptual* del proceso dinámico sobre el cual se va a intervenir.
- Modelado *matemático* del proceso
- Definición de *especificaciones de diseño*

Cuando hablamos de “proceso dinámico” nos referimos a la evolución en el tiempo de un conjunto de variables relacionadas con el estado de un sistema (posición y velocidad de una aeronave, variables termodinámicas en una columna de destilación, población de diferentes especies que coexisten en un determinado ecosistema, variables propias de un área de la economía, etc.).

Al utilizar la idea de “modelo conceptual” nos referimos a construir una “imagen” simplificada de este proceso, lo cual suele volcarse en alguna clase de esquema (un circuito electrónico, un dibujo como los que suelen usarse en la enseñanza de la física, etc.). De hecho realizamos este proceso involuntariamente a nivel mental de forma continua al pensar en el mundo que nos rodea, pero en ingeniería necesitamos plantearlo de forma consciente y rigurosa.

Ese modelo conceptual se traduce en un conjunto de relaciones matemáticas que lo describen, a lo cual denominamos “modelo matemático”.

Finalmente designamos como “especificaciones de diseño” al resultado que surge del estudio de requerimientos que motivan el diseño, tanto a nivel conceptual como cuantitativo.

El proceso de *síntesis* es generalmente un trabajo de análisis matemático (frecuentemente apoyado por el cálculo numérico), aunque en muchos casos puede realizarse de forma empírica. Sin embargo esto dista de ser una tarea mecánica. Aunque este proceso se formalice dentro de un paradigma matemático, son los aspectos conceptuales los que dominan esta tarea.

Del proceso de análisis se obtiene una versión simplificada de la realidad que, en caso de realizarse correctamente, retiene los fenómenos principales que definen la forma en la cual esa realidad evoluciona en el tiempo.

El proceso de síntesis se basa en estos resultados, y aunque pueda llevarse a cabo de forma "exacta" desde un punto de vista matemático, generará un resultado que no se ajustará de forma "exacta" a la realidad porque se realiza sobre un "modelo" que por definición es inexacto. Es por lo tanto necesario confrontar los resultados del proceso de síntesis con dicha realidad, cuestión a la que englobamos en el proceso de *verificación o validación*.

OBJETIVOS

Se pretende lograr que los alumnos sean capaces de enfrentarse a una problemática relacionada con cualquiera de los procesos antes mencionados, o con su conjunto.

De nada sirve un paquete de procedimientos memorizados porque, a pesar de que se cuenta con un conjunto muy rico de herramientas de análisis y síntesis, no existen recetas universales para resolver un problema general de control automático.

Por lo tanto pretendemos orientar al alumno hacia el desarrollo de aprendizajes significativos en análisis de procesos dinámicos y síntesis de sistemas de control.

Las cuestiones a desarrollar podrían ser condensadas en cuatro puntos:

- Entender como describir la realidad mediante un modelo matemático, y a partir de este modelo *caracterizar* dicha realidad
- Entender como traducir las necesidades que motivan el desarrollo de un sistema de control a objetivos de diseño concretos para conducir el proceso de síntesis
- Comprender las herramientas matemáticas que permiten realizar el proceso de síntesis del sistema de control

- Entender que el objetivo de un trabajo de ingeniería es alterar la realidad de alguna forma, por lo cual los resultados del diseño deben ser confrontados con esta última.

No podemos soslayar el hecho de que en todo esto no tratamos solo con contenidos académicos sino también actitudinales y procedimentales, aunque en nuestro ámbito académico sea infrecuente realizar un reconocimiento explícito de estas cuestiones. La necesidad de trabajar sobre estos contenidos se manifiesta en el planteo de todos los trabajos de aplicación, pero mucho más fuertemente en el desarrollo del trabajo integrador que se comenta más adelante.

Estas cuestiones también se manifiestan también en el desarrollo de los contenidos académicos propiamente dicho, cuando estos son puestos en contextos realistas.

ESTRATEGIA DIDÁCTICA

Partiendo de una concepción constructivista del aprendizaje nos inclinamos como ideal al modelo de clase tipo "taller", centrando el eje de la misma en el alumno.

Entendemos que la contracara sería la clase "expositiva", que consideramos muy ineficiente en relación a la construcción de aprendizajes significativos. Paradójicamente no logramos evadir esta modalidad y de hecho esta suele convertirse en dominante, lo cual adjudicamos a nuestra propia impericia para imaginar enfoques alternativos a los tradicionales.

Aun así intentamos promover el involucramiento del alumno en la clase, buscando al menos intentar un esquema híbrido en el cual se trata de plantear una actividad de tipo taller, pero sabiendo de antemano que esta terminará siendo fuertemente conducida por el docente.

Las estrategias se basan en dos elementos:

- Lograr que el alumno aborde los contenidos antes de la clase, mediante la lectura, y así facilitar su participación en la clase
- Involucrar al alumno en el desarrollo de la clase, tratando de avanzar sobre los contenidos a partir del planteo de problemas abiertos que le resulten "significativos"

Sobre lo primero, buscamos promover la lectura previa cambiando el esquema tradicional de aprobación de cursada a uno basado en cuestionarios previos a la clase realizados a través de la plataforma *Moodle*. Se trata de un conjunto de 6 preguntas de tipo

verdadero/falso, concebidas más para verificar que el alumno haya leído el material de lectura propuesto para la clase que para verificar la comprensión de los contenidos. El alumno elige cuando realizar el cuestionario hacia la tarde/noche del día anterior a la clase dentro de una cierta banda horaria, con tiempo acotado y un solo intento.

En general en la clase previa se realiza una introducción a la temática, para facilitar la lectura.

Respecto del segundo punto, durante la clase se busca presentar los contenidos a partir de objetivos concretos vinculados con lo visto durante el curso hasta ese momento. De ser posible, estos objetivos se plantean a partir de necesidades concretas frecuentemente encontradas en situaciones reales (o al menos “realistas”).

El realismo que mencionamos debe ser perceptible para el alumno si pretendemos lograr algún efecto. Recordemos que tratamos de presentar contenidos de carácter abstracto y con formulaciones matemáticas pesadas, lo cual plantea como desafío el de diluir esa abstracción sin perder en el intento la “universalidad” del concepto que está asociada a dicha naturaleza abstracta.

Para conducir estas presentaciones elaboramos lo que hemos dado en denominar “laboratorios virtuales” para estos escenarios realistas. Estas simulaciones se basan en modelos numéricos lo más completos posibles, usando en general animaciones basadas en archivos VRML para su visualización.

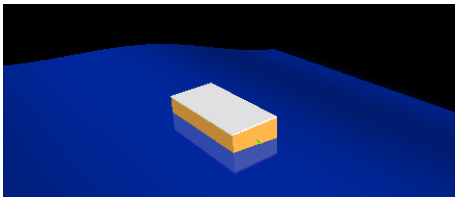
Aunque no es original la idea de usar simulaciones como estrategia didáctica, lo que queremos destacar acá es que se realiza el mayor esfuerzo en darle realismo a esta práctica. De hecho, si fuera materialmente posible la actividad debería ser directamente experimental.

Muchos docentes recurren a simulaciones para aclarar conceptos, y es frecuente que dichas simulaciones se realicen a partir de modelos matemáticos. Normalmente estas simulaciones son muy útiles para comprender los mecanismos propios de una abstracción, pero no aportan mucho respecto de la relación entre dicha abstracción y la realidad.

Además de desconectar al alumno de la realidad, en esta clase de simulaciones se excluye de la discusión el proceso de modelado conceptual y matemático que el ingeniero debe realizar para atacar un problema real, siendo este proceso para nosotros una parte crítica del aprendizaje que queremos lograr.

Aunque en nuestros laboratorios virtuales usamos modelos numéricos, buscamos darle el mayor realismo usando modelos matemáticos con la menor simplificación posible y tratando de incluir condiciones de contorno detalladas. Tratamos además de interactuar con la simulación de formas creíbles, emulando los sensores y actuadores reales.

Durante las primeras clases recurrimos a casos más relacionados con las vivencias comunes de las personas, usando simulaciones instrumentalmente menos complejas.



Uno de los primeros ejemplos que presentamos es el de un cuerpo flotante sobre el cual podemos ajustar la altura de su centro de gravedad, y simular olas con diferentes características.

Este ejemplo se usa especialmente para hablar de la *linealización* de modelos matemáticos, cuestión básica no solo para la teoría de control clásica sino también para la mayor parte de la ingeniería. Con este ejemplo se estudia la validez y limitaciones asociadas al uso de modelos matemáticos *lineales*, y también se muestra como la matemática es capaz de superar a la intuición a la hora de hacer predicciones.

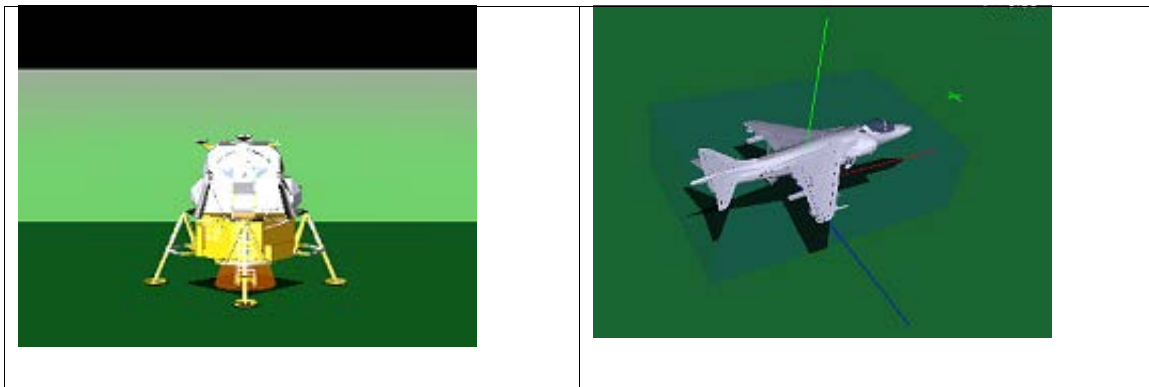


Otro ejemplo de la vida corriente se presenta al estudiar el movimiento de un vehículo en función de las características de su sistema de suspensión.

Este ejemplo le brinda al alumno la posibilidad de corroborar la validez del modelo clásico de segundo orden visto en materias previas; al tiempo que se pone en evidencia que algunos modelos matemáticos, a pesar de su simplicidad, resultan sumamente efectivos para describir aspectos centrales de la realidad.

También usamos como ejemplos el caso de un termotanque eléctrico con control de temperatura, o el de un tanque de agua con control de nivel.

A medida que avanzamos en el curso, teniendo en cuenta la naturaleza de nuestra carrera, orientamos los ejemplos al campo aeroespacial. Existen muchos problemas concretos accesibles para ser modelados numéricamente, y por sobre todo, que pueden ser fácilmente interpretados por el alumno. Reproducimos el alunizaje de la misión Apollo o el vuelo estacionario de una aeronave de despegue vertical.



Mediante las consignas de trabajo en clase se estimula fuertemente al alumno a pensar como atacar ciertos problemas de control automático, desde el proceso básico de definición de requerimientos hasta la concepción de experimentos e instrumentación, tanto para validar los modelos matemáticos como para confrontar los resultados del diseño.

Este tipo de situaciones resulta favorable además para incorporar ideas relacionadas con algunas soluciones tecnológicas para la implementación de un sistema de control (sensores, actuadores, compensadores, etc.).

Trabajos Prácticos y Trabajo Integrador

Las actividades en clase se complementan con el planteo de trabajos prácticos de carácter abierto para la aprobación de la cursada, y un trabajo integrador para promocionar la materia. Partimos del supuesto de que el trabajo en clase no permite por si mismo completar el proceso de aprendizaje de los contenidos; y que necesariamente serán estas actividades extra-áulicas las que brinden chances de concretarlo.

Aunque se trate de planteos abiertos, los trabajos prácticos se enfocan a aspectos puntuales de los contenidos que se van desarrollando en la asignatura, y en general no involucran el uso de los laboratorios virtuales. En contraste a esto, para el trabajo integrador se pide

validar el desarrollo con el laboratorio virtual correspondiente; es decir, incluir en el proceso el trabajo “experimental” de forma simulada. Buscamos así que en este esfuerzo el alumno construya una respuesta “efectiva” para un determinado problema, y no la mera aplicación de recetas de cálculo.

Para el Trabajo Integrador se plantea como tarea el diseño de un sistema de control de vuelo para una aeronave, brindando solo datos relacionados con la respuesta aerodinámica y parámetros inerciales de la aeronave, y poniendo a disposición el laboratorio virtual correspondiente.

El desarrollo de un trabajo de este tipo implica no solo el abordaje de los contenidos académicos, sino también la necesidad de gestionar el proyecto y resolver las situaciones de crisis (tecnológica) que inevitablemente se harán presentes.

Particularmente es necesario manejar la tensión que se genera entre la ansiedad por realizar avances y la incertidumbre propia de los primeros pasos del desarrollo. Posteriormente el alumno necesita manejar los sucesivos fracasos que surgen normalmente durante todo proceso de desarrollo, planteando estrategias de diagnóstico y solución.

Finalmente el alumno debe plantearse la cuestión de dar una solución realista. En su informe debe justificar en base a argumentos técnicos creíbles la viabilidad concreta de su trabajo a modo de ante-proyecto.

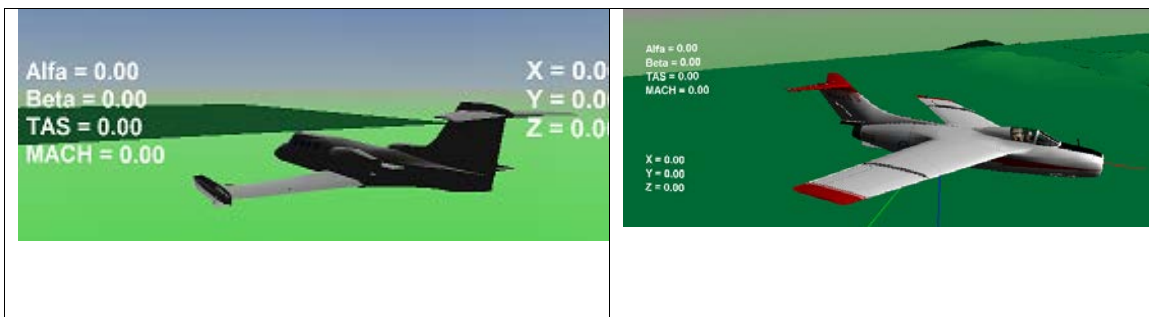
La labor docente se produce en los momentos de consulta. Tratamos de aportar al alumno una visión desde la *Ingeniería de Sistemas* de la industria aeroespacial para afrontar estos desafíos. En particular estimulamos al alumno para adoptar un proceso de desarrollo iterativo y una filosofía de *diseño orientado a requerimientos*. A su vez planteamos la necesidad de utilizar el concepto de *prueba unitaria*, especialmente en la resolución de problemas.

El alumno se ve en la necesidad de:

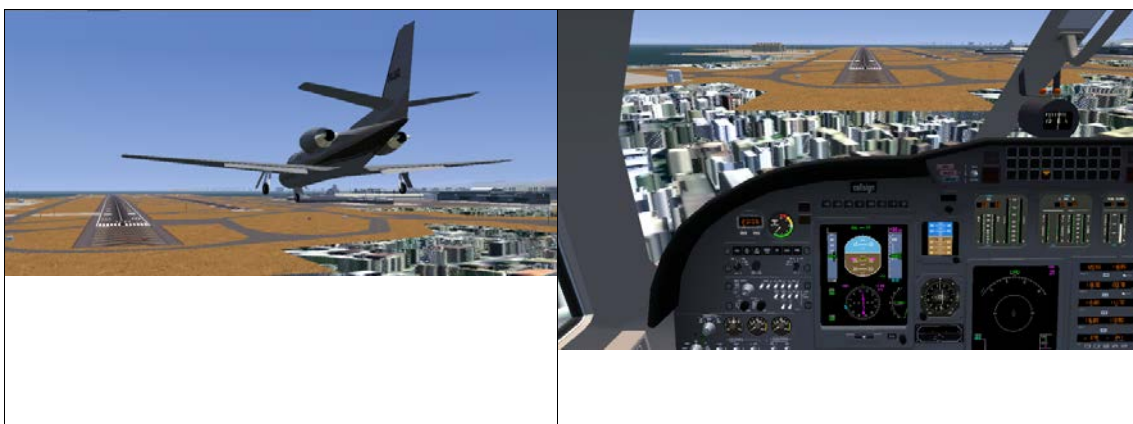
- Reconocer los requerimientos de la misión que se plantea, y definir a partir de ello especificaciones de diseño razonables
- Formular un modelo conceptual y una arquitectura de control para atacar el problema

- Elaborar el modelo matemático necesario para los procesos de síntesis, y validar dichos modelos de forma pseudo-experimental; esto es, definir ensayos de vuelo que luego son ejecutados mediante el laboratorio virtual
- Realizar los procesos de síntesis de los componentes del sistema de control, y construir simulaciones simplificadas para verificar sus resultados
- Pasar nuevamente al proceso pseudo-experimental, para validar el diseño

En la simulación se utiliza un modelo numérico que incluye de forma detallada el comportamiento aerodinámico en distintas condiciones de actitud y velocidad, variaciones de los parámetros atmosféricos con la altura, perturbaciones debidas al viento y turbulencia, ruidos de medición en los sensores, etc.



Recientemente hemos logrado construir las visualizaciones correspondientes mediante un simulador de vuelo de código abierto (*FlightGear*). Con esto buscamos acercar al alumno a la experiencia que tendría en caso de realizar las pruebas de validación de su diseño con una aeronave real.



CONCLUSIONES


Nuestra Facultad estableció desde hace muchos años la integración entre teoría y práctica como Norte para la planificación didáctica. Por otro lado en la actualidad queda claro que el aprendizaje requerido por un ingeniero es aquel que denominamos “significativo”.

Intentamos resolver estas cuestiones presentando los contenidos desde la realidad, en lugar de hacerlo desde la teoría.

Dado que las limitaciones materiales en general no nos permiten llevar la realidad al aula, recurrimos a la simulación numérica como sustituto. Pero entendemos que la simulación debe “parecerse” a la realidad, en lugar de limitarse a mostrar resultados numéricos de un modelo matemático.

Para una materia como Control y Guiado es factible introducir realismo suficiente en estas simulaciones como para presentar problemas abiertos concretos, estimulando al alumno no solo a comprender conceptos teóricos sino también a trabajar sobre los procesos de modelado; y entender la utilidad y limitaciones de los enfoques teóricos. En otras palabras, este es un camino que nos permite *integrar la teoría con la práctica*, y a su vez trabajar no solo con los contenidos académicos sino también con aquellos de carácter actitudinal y procedimental.

EJE 4



“Prácticas socio-comunitarias en la formación y compromiso social de la Universidad”.