

PROCESO DE ANÁLISIS EN INGENIERÍA COMO ESTRATEGIA PARA LA PROFESIONALIZACIÓN DEL DOCENTE-INGENIERO*

Nelson Obregón Neira

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia)

Resumen

Las carreras profesionalizantes como las Ingenierías abarcan dos grandes acciones: (1) Análisis o modelación y (2) Diseño ó síntesis. Todos los ingenieros son formados en conocimiento y habilidades para desarrollarlas y potenciarlas plenamente. No obstante, como es sabido estos mismos ingenieros que también eventualmente conforman las plantas docentes de escuelas de ingeniería no reciben formación explícita en la profesionalización docente tan fundamental y requerida en el proceso de formación de nuevos ingenieros. En este contexto, este trabajo procura aprovechar las fortalezas convencionales de la formación en el análisis ingenieril como estrategia para potenciar y facilitar la profesionalización del ingeniero docente. La discusión se da desde los mismos componentes de este proceso que incluye: (1) Sistema de información; (2) Desarrollo del modelo conceptual; (3) Desarrollo del modelo matemático; (4) Desarrollo del aplicativo computacional; (5) Calibración y validación de los modelos; (6) Creación de escenarios; y (7) Simulación. El trabajo explicita estos componentes y proporciona ejemplos en problemas de ingeniería, argumentando que este proceso, no sólo representa la fortaleza formativa de un ingeniero, sino también lo propone como estrategia para mejorar la labor docente del mismo. Incluso, desde la misma planeación de la clase, este proceso le permite al profesor ingeniero formar cuadros mentales y “cartas de navegación” para racionalmente enseñar y educar al estudiante de lo verdaderamente fundamental requerido por su profesión en las próximas décadas. Ejemplos se proveen para fundamentar esta proposición. Adicionalmente, el proceso de modelación no sólo ofrece otra estrategia de mejoramiento del docente ingeniero, sino también se propone como mecanismo para el diseño curricular de diferentes niveles de formación incluyendo el pregrado, las maestrías y los doctorados en ingeniería. Este último aspecto se ejemplifica empleando la experiencia de la Pontificia Universidad Javeriana en el proceso recientemente llevado a cabo en torno a la concepción y escritura de la propuesta de Doctorado en Ingeniería para esta Universidad de cuyo grupo ejecutor el autor del trabajo fue líder.

Palabras clave: modelación y diseño en ingeniería, modelo conceptual, profesionalización docente en ingeniería.

* Trabajo acreedor del Premio ACOFI 2007, Segundo Lugar, Modalidad Ponencia Oral. “El profesor de ingeniería, profesional de la formación de ingenieros”. XXVII Reunión Nacional y VI Encuentro Iberoamericano, Cartagena de Indias (Colombia), Octubre de 2007

Abstract

Professional careers such as engineering comprise two general activities: (1) Analysis (Modeling) and (2) Design. And all the engineers are prepared in both knowledge and skills to constantly enhance them. However, as it is known these same engineers also will conform engineering faculty staff that will never explicitly receive professional training for lecturing which is required to teach young engineering students. In this light, this work is aimed at taking advantage of conventional strengths of the analysis engineering process as it is considered as proper strategy to enhance and facilitate lecture training for engineering teachers. Discussion is given from stages of this process which include: (1) Information systems; (2) Development of conceptually-based model; (3) Development of mathematical model; (4) Development of computer program; (5) Calibration and validation; (6) Creating scenarios; and (7) Simulation. In these regards, this work explains these components and gives examples of engineering problems in which it is argued that this process, not only represents formative strength of an engineer, but also it is proposed as strategy in order to improve his lecturing activities. Indeed, from the class planning, this process allows to lecturer-engineers make mental pictures and “navigation charts” for rationally teaching and educating students on the fundamental basis required for their next-future as engineers. Examples are given in order to justify this proposal. Furthermore, this modeling process not only offers another strategy to improve the lecturer-engineer, but also it is proposed as mechanism for designing curricular engineering programs independently of their academic levels (undergraduate, master and doctoral programs). This last aspect is exemplified by recent experience of Javeriana University during process carried out in regards of conception of proposal for the Engineering Doctoral Academic Program.

Keywords: modeling and design in engineering, conceptually-based model, professional lecturer in engineering.

Introducción

En el ingeniero-docente resulta importante concienciar en torno a las fundamentaciones teóricas, prácticas y metodológicas de su formación profesional convencional, pues esto le permitirá mejorar sus prácticas pedagógicas y, en general, avanzar hacia su profesionalización docente. En este sentido, dentro de la fundamentación teórica es conveniente extraer los siguientes conceptos: sistemas y subsistemas en ingeniería; procesos y señales, equipos y materiales y demás recursos. Estos aspectos se consideran forman parte de todo problema encontrado en ingeniería y aparecen en todas las actividades de modelación y análisis que adelantan los ingenieros. Después de esta fase sigue la de diseño, que es asociado principalmente con la acción de elaboración de planos y/o especificaciones conducentes; ya sea a la construcción de sistemas (subsistemas y componentes) o a la implementación de procesos, en este caso en el contexto de la ingeniería. En esta acción reposa la gran parte del trabajo final en estudios de ingeniería y es la que contribuye y procura, junto con la construcción e

implementación funcional, al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades. De otra parte, la fundamentación práctica tiene que ver con las acciones de análisis y síntesis, las cuales resultan ser equivalentes respectivamente a la modelación y la construcción en ingeniería. Además, condensan en gran parte las actividades de los ingenieros. De esta forma, específicamente los fundamentos prácticos se presentan a la luz del proceso de modelación, considerado como requisito para ejecutar la acción de diseño, construcción e implementación de sistemas y procesos en ingeniería. Dicho proceso se acepta que puede ser adelantado a través del desarrollo de las siguientes etapas: (i) Recolección de información base; (ii) Desarrollo del modelo conceptual; (iii) Desarrollo del modelo matemático; (iv) Desarrollo de aplicativos computacionales; (v); Calibración y validación de modelos; (vi) Creación de escenarios; y (vii) Simulación de escenarios (viii) Implementación de soluciones. Finalmente, para la fundamentación metodológica, se deben cumplir los objetivos de formación integral, perfiles de formación y competencias, los cuales requieren de un ambiente

educativo dinámico y altamente interrelacionado. Dicho ambiente está formado por cuatro aspectos metodológicos o dimensiones fundamentales: La *profundización y adquisición del conocimiento*, la *investigación científica*, el *acompañamiento académico* y la *validación y comunicación*. Cada dimensión tiene una dinámica que interactúa con la de las otras dimensiones. Por limitaciones de espacio en este documento, sólo se ampliarán los conceptos de fundamentación práctica en el contexto de la profesionalización docente.

Fundamentación práctica del ejercicio de la ingeniería

La fundamentación práctica en el proceso de modelación y síntesis en ingeniería puede ser adelantado a través del desarrollo de las siguientes etapas: (i) Recolección de información base; (ii) Desarrollo del modelo conceptual; (iii) Desarrollo del modelo matemático; (iv) Desarrollo de aplicativos computacionales; (v) Calibración y Validación de modelos; (vi) Creación de escenarios; y (vii) Simulación de escenarios (viii) Implementación de soluciones.

Implementación de un sistema de información base

Un sistema de información (SI) comprende entre otros componentes: personas, instituciones, protocolos, hardware, software, bases de datos, etc. por lo que incluso puede ser el objeto final en la acción de diseño. No obstante, la implementación del SI base referido en este proceso de modelación comprende aquella información básica que permite avanzar hacia la construcción de un modelo conceptual que permita aproximar y estudiar el problema planteado como tal. En este sentido comprende la siguiente información: descriptores del problema planteado, información primaria, información secundaria. Esta última se refiere a la existente y que es recolectada a través de estudios anteriores o en sistemas de información de otras fuentes ajenas al proyecto. En cuanto a la información primaria, ésta comprende la que es generada directamente a partir de mediciones nuevas. Para los dos tipos, sobre los datos originales deberán desarrollarse estudios de consistencia y de

caracterización de tal forma que la información pueda ser confiable. Las caracterizaciones de la información expresadas son de tipo estadístico. Esto es, análisis lineal y no lineal de procesos, estudios de correlación lineal y no lineal multivariado para campos espaciales, y correlaciones espacio-temporales de escalares indexados en el espacio, entre otros. Como parte de los SI base se incluye también el proceso eventual de diseño e implementación de muestreos y sistemas de medición, para lo cual el estudiante doctoral también debe estar entrenado.

Desarrollo del modelo conceptual

A partir del SI base se identifican los fenómenos que tienen lugar en el sistema y en los subsistemas, así como los que regulan los procesos. De esta forma, se pueden asociar variables y su observabilidad y controlabilidad, escalas dominantes a diferentes niveles de agregación temporal y espacial. También a partir del SI base se debe procurar establecer no sólo la naturaleza lineal y no lineal del sistema y sus señales, sino también el carácter determinístico o estocástico de los mismos. Se deben inferir también rasgos de estacionariedad o no-estacionariedad, así como de heterogeneidad y anisotropía. Todas estas características permitirán desarrollar el modelo conceptual que servirá para estudiar y aproximar el problema planteado. En este sentido, se deberán responder los siguientes interrogantes, entre otros: (i) ¿Se puede y debe aproximar el problema con bases físicas (modelos de “caja blanca”) o prescindiendo de ella (modelos de caja negra), o con modelos mixtos? (ii) en caso de modelos de “caja blanca”, ¿cuáles son las leyes y principios que subyacen al sistema y a los procesos? (iii) ¿Son leyes de conservación? ¿O leyes y principios del electromagnetismo? (iv) En caso de leyes de conservación, ¿es suficiente con conservación de masa, o se requieren otras igualdades de conservación de momentum (2ª Ley de Newton) y de energía? (v) ¿Si se requiere conservación de momentum, ¿cuáles son las fuerzas más relevantes? (vi) En caso de no requerirse leyes o principios de la física, ¿la aproximación es con modelos guiados por datos, es decir, aproximaciones estadísticas convencionales. o de sistemas inteligentes y “*machine learning*”? O (vii) ¿La aproximación es

con modelos probabilísticos de inferencia, o asociados a procesos o campos aleatorios? (viii) ¿Cómo tratar la incertidumbre, con lógica difusa, actualizaciones bayesianas, teoría de incertidumbre? (ix) ¿Cómo se aproximará el estudio de la confiabilidad de los resultados?

Desarrollo del modelo matemático

A partir del desarrollo del modelo conceptual, se procede con el (o los) desarrollo(s) de el (los) modelo(s) matemático(s). En primer lugar, se deberán establecer las expresiones matemáticas, algoritmos y reglas funcionales que incorporen las variables (de entrada y salida) y/o los parámetros que gobiernan el modelo conceptual. Para esto es conveniente establecer los descriptores, si son de tipo aritmético, algebraico (ej. lineal, o álgebras avanzadas de Lie), topológicas, o de cálculo: diferencial, tensorial, vectorial, integral, de cuaterniones u octoniones, entre otros. Adicionalmente, se debe establecer la necesidad no sólo de trabajar en un espacio transformado (Laplace, Fourier, *Wavelets*, Hilbert, etc), sino también de realizar transformaciones de coordenadas (cartesianas, curvilíneas (circulares, cilíndricas, cúbicas), de fuerza, etc.). También son parte del modelo matemático tanto las condiciones de frontera, como las condiciones iniciales, el carácter de las ecuaciones es determinístico o estocástico, (en el último caso, ¿se requiere del cálculo estocástico de Ito o de Stratonovich?) En esta etapa también resulta relevante estudiar el carácter de las bases numéricas (binarias, octales, decimales, etc.) y de las soluciones de las ecuaciones. Para el último aspecto, ¿son de tipo analítico o numérico?. Si son numéricas las soluciones, ¿se requieren discretizaciones espaciales y temporales (diferencias finitas, elementos finitos, elementos de frontera)?

Desarrollo de aplicativos computacionales

Esta etapa ha sido ubicada después de estas tres primeras por considerarse que existe un mayor esfuerzo para el desarrollo de aplicativos computacionales orientados al estudio de los modelos matemáticos. No obstante, los requerimientos de dichos aplicativos quedan establecidos en todas las etapas del proceso de

modelación. En cualquier instancia, se deben implantar requerimientos de funcionalidad para los sistemas operativos, procurando identificar en función de sus requerimientos y características particulares. Por la naturaleza del programa, se espera que ellos además del sistema operativo de *Windows* también sean entrenados y logren funcionalidad en Linux y Unix. Para el caso de los lenguajes de programación es conveniente adaptarse a compiladores de alto desempeño, como el Fortran77 y el C, paralelamente con lenguajes orientados a objetos como el C++ y *VisualBasic*, según sea el caso que se requiera. Los lenguajes de programación matemática también son deseables para lograr funcionalidad. Entre ellos se tienen, el *Matlab*, *Maple*, y *Mathematica*, entre otros. Además de los procesadores de texto convencionales, se procurará adaptarse a los de la familia *LATEX* y *TEX*, como procesadores científicos de texto. Para el caso de lenguajes de visualización científica, también se espera que el estudiante reciba entrenamiento en algunos comerciales tales como *IDL* o *PvWave* y otros de libre distribución. Los aplicativos computacionales requeridos pueden desarrollarse en este tipo de software, aunque se deba procurar revisar en el mercado la disponibilidad inmediata de los mismos. Se prevé también en algunos casos el uso de software especializado como por ejemplo los de sistemas de información geográfica, manejadores de bases de datos y paquetes estadísticos, entre otros. En cualquier instancia y para el caso de desarrollo de *software*, se debe entrenar a los estudiantes a seguir los pasos convencionales de la ingeniería de *software*.

Calibración y validación de los modelos

Una vez se disponga de los modelos conceptual y matemático ya afinados, se procederá a calibrar y validar dichos modelos. Todos los modelos de ingeniería son caracterizados por variables y parámetros. Estos últimos caracterizan y condicionan las salidas de aquellos. Por esta razón son los que se deben encontrar y ajustar de tal forma que las respectivas salidas para un conjunto de ellos sean “similares” a los respectivos valores homólogos observados o condicionados a través de un experimento controlado de calibración. En este contexto, a este problema se le conoce también como

el problema inverso, el cual implica una búsqueda de parámetros que puede ser aproximada mediante la formulación de un problema de optimización (búsqueda mínimos o máximos) matemática. En este sentido, se deben formular funciones objetivos con sus respectivas restricciones de búsqueda. Esta es una labor fundamental en el proceso de modelado en ingeniería, por lo que los estudiantes doctorales deberán ser entrenados en algoritmos de búsqueda matemática como por ejemplo: los métodos de gradiente, los algoritmos de Montecarlo y las metaheurísticas: “*simulated annealing*”, “*simplex multidimensional*”, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, etc. La validación del modelo puede ser entendida como el paso siguiente a la calibración, en donde se dispone de un conjunto posible de parámetros (obtenido del proceso de calibración) y se desea estudiar la influencia de los mismos con mediciones de salida observadas no empleadas en la calibración. También es importante, además de saber formular adecuadamente el problema de optimización, el conocimiento de los indicadores estadísticos de desempeño y los análisis de sensibilidad.

Creación y simulación de escenarios

La calibración y validación de los modelos se realiza empleando información de las denominadas líneas bases, es decir a partir de las observaciones realizadas y de las características actuales de los sistemas. No obstante, hoy por hoy los ejercicios de modelado se completan para varias posibilidades de ocurrencia, para lo cual deben construirse escenarios tanto para las variables de entrada al sistema, como para las variables y parámetros que gobiernan y caracterizan el modelo. En dicha creación de escenarios, se debe procurar tener en cuenta, además de la viabilidad física, biológica o química, las consideraciones de viabilidad energética, ecológica, económica y social. Esta construcción de escenarios puede llevarse a cabo a partir del conocimiento experto (determinístico) de los modeladores o bajo consideraciones altas de incertidumbre apoyados en la generación sintética de señales posibles (realizaciones) de naturaleza estocástica. Una vez se hayan construido los escenarios posibles, para cada uno de ellos se ejecutará el modelo en forma directa para así obtener la respectiva salida correspondiente a dicho

escenario. Esta etapa en el proceso de modelado es la que ha permitido mayor flexibilidad a los políticos y tomadores de decisiones en cuanto se da un espectro amplio de posibilidades de comportamiento robusto a los sistemas.

Implementación de la solución

El objeto final de la ingeniería es la solución de problemas empleando tecnologías derivadas del conocimiento científico. Los pasos anteriores permiten identificar formalmente el problema, modelar su comportamiento, simular su desenvolvimiento bajo diferentes escenarios y manipulación de sus variables. Finalmente, el ingeniero implementa estas soluciones empleando un conjunto de herramientas tecnológicas. En esta fase es necesario revalidar o verificar las hipótesis establecidas en las fases anteriores y observar las diferencias, pues de ellas se derivarán las reformulaciones sucesivas de los modelos necesarios para alcanzar la solución del problema.

Fundamentación práctica del ejercicio de ingeniería y buenas prácticas del ingeniero-docente

Toda clase de ingeniería debe prepararse y debe tener un plan de desarrollo, indistintamente de su carácter y nivel académico. La propuesta de este trabajo es que estas acciones sean enmarcadas en las etapas de la fundamentación práctica expuestas anteriormente. En primer lugar se deberá enmarcar la temática de la clase en cuestión en una o varias de estas etapas, de tal forma que el estudiante sea ubicado en un proceso de modelación y síntesis. Esto además de establecer los alcances de la clase, permite enfatizar la motivación e imprimirle a ésta el carácter de “problem-oriented” propio de una formación ingenieril. Si por el contrario no se realiza esta ubicación temática, el estudiante (incluso el profesor) tendrá(n) la sensación al final de la clase de haber tratado temas aislados sin motivación alguna. En este sentido, uno de los errores clásicos que se cometen en el desarrollo de las clases corresponde al paso directo de la primera etapa del sistema de información, directamente al paso de la modelación matemática, o en el peor de los casos al modelo

computacional, obviando así la discusión del modelo conceptual, la etapa más importante en el proceso. Pues allí es donde se piensa, se asocia el problema con las características de los sistemas y señales involucradas en el mismo y obviamente se avanza hacia la mejor aproximación deseada. El paso directo de la información a los modelos matemáticos está limitando la capacidad del estudiante a sólo el empleo de fórmulas y recetas que no motivan su criterio, sino por el contrario lo vuelven errático cuando se presenten situaciones similares en otros contextos. Si el estudiante no tiene la oportunidad de pensar (modelo conceptual), correrá riesgos de convertirse en un profesional de criterio pobre y seguramente estará altamente cuestionado en grupos de trabajo e interdisciplinario cuando sea solicitado su aporte. Por favor profesores (ingenieros), el mayor énfasis de una clase tiene que estar en el modelo conceptual, no en la “carpintería” matemática e informática. Eso es necesario, y tenemos que darlo eventualmente, pero no es lo más importante. Se requiere mayor intuición, mayor asociación de órdenes de magnitud, mayor ingenio y este se logra simplemente con la estructuración mental de los futuros ingenieros en el modelo conceptual.

Volvamos a repasar, con las preguntas típicas del desarrollo de un modelo conceptual: (i) ¿Se puede y debe aproximar el problema con bases físicas (modelos de “caja blanca”) o prescindiendo de ella (modelos de caja negra), o con modelos mixtos? (ii) en caso de modelos de “caja blanca”, ¿cuáles son las leyes y principios que subyacen al sistema y a los procesos? (iii) ¿Son leyes de conservación? ¿O leyes y principios del electromagnetismo? (iv) En caso de leyes de conservación, ¿es suficiente con conservación de masa, o se requieren otras igualdades de conservación de momentum (2ª Ley de Newton) y de energía? (v) ¿Si se requiere conservación de momentum, ¿cuáles son las fuerzas más relevantes? (vi) En caso de no requerirse leyes o principios de la física, ¿la aproximación es con modelos guiados por datos, es decir, aproximaciones estadísticas convencionales. o de sistemas inteligentes y “*machine learning*”? O (vii) ¿La aproximación es con modelos probabilísticos de inferencia, o asociados a procesos o campos aleatorios? (viii) ¿Cómo tratar la incertidumbre, con lógica difusa, actualizaciones bayesianas, teoría de

incertidumbre? (ix) ¿Cómo se aproximará el estudio de la confiabilidad de los resultados? Cada quien debe preguntarse, si se levantan estas cuestiones en sus respectivas clases. Mejor aun, cada quien debe preguntarse, si está preparado para promover su discusión y aparición en las mismas. Pues de lo contrario deberá mejorar su propia fundamentación. Un ingeniero podrá dictar una clase tan abstracta sobre temáticas por ejemplo “Ecuaciones diferenciales no lineales estocásticas”, pero aún así deberá existir un contexto, el cual seguramente se facilitará si se tienen en cuenta estas etapas de la fundamentación práctica del programa.

Seguramente cada docente-ingeniero, habrá desarrollado su propia metodología para la preparación y planeamiento y desarrollo de sus respectivas clases; y seguramente no necesariamente lleva este mismo proceso que se propone. Obviamente todas las aproximaciones son válidas, pues en nuestro medio hemos tenido profesores eminentes y exitosos. No obstante, el autor desea argumentar que la estructuración mental en la formación de nuestros ingenieros preferiblemente debe enmarcarse en esta fundamentación práctica, pues al fin y al cabo, ellos en el futuro ocuparán los puestos y la labor de los que hoy somos sus profesores. Y qué mejor que ellos mismo sean conscientes desde el principio y desde el ejemplo de su maestro de estas buenas prácticas.

Comentarios finales

Se han revisado las etapas de la fundamentación práctica en el ejercicio de la ingeniería argumentando que éstas son relevantes para la elaboración de cuadros mentales para la preparación y desarrollo de las clases de los ingenieros-docentes. Y aunque esto por sí solo resulta relevante, es conveniente enfatizar que estas etapas también permiten enmarcar los diseños curriculares de programas de ingeniería. Por ejemplo, para el caso de la concepción de la propuesta de creación del Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, en la cual se tuvieron en cuenta estos conceptos para enlazar el currículo propuesto. En el nivel de ofertas de asignaturas para este programa, esta concepción permitió agregar profundizar temáticamente según el

nivel requerido del doctorado, permitiendo la inclusión de asignaturas de alta fundamentación matemática, física e informática. De igual forma, en el nivel investigativo, en donde los dispositivos para garantizar este requerido carácter en el estudiante de ingeniería doctoral fueron contextualizados con prácticas académicas de estas etapas. Este enlace final, fue posible realizando las líneas de investigación a la luz de la fundamentación práctica que actualmente implementa en el desarrollo de sus proyectos.

“El Doctorado es el programa académico de posgrado que otorga el título de más alto grado educativo, el cual acredita la formación y la competencia para el ejercicio académico e investigativo de alta calidad. (...) tienen como objetivo la formación de investigadores con

capacidad de realizar y orientar en forma autónoma procesos académicos e investigativos en el área específica de un campo del conocimiento” (MEN, 2006). Los doctorados en ingeniería en Colombia son escasos, reportándose en la actualidad sólo nueve (9) universidades en el país que ofrecen esta formación avanzada. Tal y como se resalta anteriormente el diseño curricular debe estar orientado hacia la formación de investigadores autónomos en los campos de la ingeniería. En este sentido, el autor de este trabajo, está convencido que esta autonomía deberá ser lograda (incluso en el nivel de pregrado y maestría en ingeniería), en la medida que los estudiantes fundamenten profundamente el adecuado desarrollo de la etapas de la fundamentación práctica de su quehacer ingenieril y que se han expuesto en el presente trabajo.

Sobre el autor

Nelson Obregón Neira

Ingeniero Civil. Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta, Colombia 1991).

Magister en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes (Bogotá, Colombia 1993).

PhD en Ciencias Hidrológicas. University of California (Davis, USA 1998).

Profesor Titular. Director del Grupo de Investigación “Hidrociencias”. Director de la Maestría en Hidrosistemas y del Instituto Geofísico de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

Profesor Catedrático Universidad Nacional.

Dirección U. Javeriana: Carrera 7 No. 40-62.

nobregon@javeriana.edu.co

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