

09-005

**EDUCATIONAL IMPROVEMENT INCORPORATING SUSTAINABILITY IN ENERGY AND CONSTRUCTION ENGINEERING. REFLECTIONS AFTER 25 YEARS OF EXPERIENCES**

de la Cruz López, M. Pilar (1); Cartelle Barros, Juan José (1); Castro Rascado, Alberto (1);  
Lara Coira, Manuel (1); del Caño Gochi, Alfredo (1)

(1) Universidade da Coruña

At the University of A Coruña, one of the authors started 25 years ago to introduce sustainability concepts in an energy planning subject. Two other authors, more than 20 years ago, included sustainability in subjects related to construction engineering of industrial complexes. Progressively, the contents were increased, and more and more didactic exercises and case studies were incorporated. This has continued in undergraduate and master's degree courses related to the aforementioned subjects, in the new Bologna degrees, with the participation of all the authors. Simultaneously, the authors have participated in research projects on these subjects, publishing the corresponding results. Two authors have also participated in the generation the sustainability assessment models of the Spanish structural codes. All this has enabled the proposal and subsequent teaching of a specific subject on sustainability assessment and optimisation of energy systems. In addition, a chapter on sustainability management has been included in a master's degree course on project management. Various reflections are presented on all these experiences, useful for the education improvement in engineering and architecture degrees.

Keywords: Education improvement; sustainability; energy engineering; construction engineering; industrial engineering

**MEJORA DE LA DOCENCIA INCORPORANDO LA SOSTENIBILIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA Y DE LA CONSTRUCCIÓN. REFLEXIONES TRAS 25 AÑOS DE EXPERIENCIAS**

En la Universidade da Coruña, uno de los autores comenzó hace 25 años a introducir conceptos de sostenibilidad en una asignatura de planificación energética de la antigua titulación de ingeniería industrial. Otros dos autores, hace más de 20 años, incluyeron la sostenibilidad en las asignaturas de construcciones industriales de dicha titulación. Progresivamente, los contenidos fueron aumentando, y se incorporaron ejercicios y casos prácticos, cada vez más didácticos. Esto ha continuado en asignaturas de grado y máster relacionadas con las materias antes referidas, en los nuevos planes Bolonia, con la participación de todos los autores. Simultáneamente, los autores han participado en proyectos de investigación sobre dichos asuntos, publicando los correspondientes resultados. Dos autores han participado también en la generación de normativa estructural española, en materia de sostenibilidad. Todo ello ha permitido proponer y, posteriormente, impartir, una asignatura específica sobre evaluación y optimización de la sostenibilidad de sistemas energéticos. Además, se ha incorporado un capítulo sobre gestión del objetivo de sostenibilidad en una asignatura de máster sobre dirección de proyectos. Sobre todas estas experiencias se presentan diversas reflexiones, de utilidad para la mejora de la docencia en titulaciones de ingeniería y arquitectura.

Palabras clave: Mejora de la docencia; sostenibilidad; ingeniería energética; ingeniería de la construcción; ingeniería industrial.

Correspondencia: Alfredo del Caño Gochi. Correo: alfredo.cano@udc.es

Agradecimientos: A los alumnos que durante todos estos años han sido el objetivo de estos esfuerzos, y especialmente a los que nos han aportado realimentación para seguir mejorando cada curso.



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción y objetivos

En la estela, crítica con el crecimiento económico, dejada por Mishan (1967), un grupo de científicos, liderados por Donella Hager Meadows, presentaba en el verano de 1971 los resultados de un estudio que se publicaría al año siguiente con el título de “Los límites del crecimiento: Un informe para el Proyecto del Club de Roma sobre el Predicamento de la Humanidad” (Meadows et al. 1972). Pese a las críticas recibidas por su maltusianismo, estimuló la necesidad de profundizar en la dinámica de las interacciones de la humanidad sobre el planeta, y las consecuencias de un crecimiento ilimitado de la actividad humana sobre los ecosistemas y la propia población mundial.

Veinte años más tarde, Bouvier y Grant (1994) examinaban la inevitable y creciente degradación del medio ambiente que se produciría si el crecimiento de la población superase los límites de la ya casi agotada capacidad de carga ambiental, con aire sucio, agua envenenada, bosques destruidos, pérdida de suelos, desaparición de especies, deterioro de las ciudades y una brecha cada vez más grande entre ricos y pobres.

Como consecuencia de estos novedosos enfoques de la actividad humana y de su repercusión sobre el planeta, fueron apareciendo términos y conceptos de aplicación específica y creciente en prácticamente todos los sectores de actividad, desde la economía a la agricultura, y con singular repercusión en el sector energético, la construcción y la industria. Este nuevo corpus léxico, así sobrevenido en el último tercio del siglo XX, quedaría definitivamente enmarcado por los términos “desarrollo sostenible” (United Nations, 1987) y “sostenibilidad integral” (United Nations, 1992).

La progresión en los ámbitos de la energía y la construcción (y no sólo en ellos) ha ido transitando del mero aprovechamiento de los recursos naturales a su domesticación y abuso, contrariando muchas veces a la propia naturaleza y a la misma humanidad, llegando a poner en peligro su propia existencia. Parece indiscutible asumir una etapa definitiva en la necesaria armonización de intereses para perseguir la sostenibilidad, claramente definida, ya en 1987, en el llamado *Brundtland Report* (United Nations, 1987) por sus tres ámbitos base, económico, social y ambiental, explicada con más detalle en 1992 por las Naciones Unidas (United Nations, 1992), y desmenuzada, bastante más tarde (entre 2012 y 2015), por medio de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas (PNUD, 2022). Poco recelo debería suscitar la propuesta de su imprescindible incorporación al ejercicio docente.

La inclusión a partir de 1996 de ciertos conceptos relacionados con la sostenibilidad de los sistemas energéticos, entonces novedosos en la docencia relacionada con el uso de la energía, ayudó a mejorar la percepción de la importancia de una consideración holística de la sostenibilidad de los proyectos, en el posterior ejercicio profesional del alumnado. Esta primera experiencia fue desarrollada por Lara en el marco de una asignatura de planificación energética de la titulación de Ingeniería Industrial de la Universidad de La Coruña (UDC). Pocos años más tarde, sin relación con lo anterior y en un área de conocimiento diferente, de la Cruz y del Caño incluyeron conceptos básicos de sostenibilidad en las asignaturas de construcciones industriales impartidas aquella titulación. También en las asignaturas de los antiguos planes de estudios de Doctorado se incluyeron estos contenidos, resultando Tesis Doctorales en las cuales el asunto esencial era la sostenibilidad de sistemas ingenieriles.

Con la colaboración del resto de los autores, progresivamente, se ha pasado a la situación actual, en el marco de los planes de estudios resultantes del Tratado de Bolonia, con un conjunto variado de asignaturas, pertenecientes a titulaciones de grado y maestría. También se han incluido contenidos de sostenibilidad en diferentes Cursos de Verano sobre energías renovables impartidas en la UDC. Fuera de la UDC, cuatro de los autores han incluido este tipo de contenidos en asignaturas del Máster en Dirección de Proyectos de la Universidad de

Santiago de Compostela (USC), del de Ciencia, Tecnología y Gestión Ambiental de la USC, y del de Energía y Sostenibilidad de la Universidad de Vigo.

El objetivo de esta comunicación es resumir los contenidos que se incluyen en las principales asignaturas de la UDC en las que imparten docencia los autores, el tipo de ejercicios y casos prácticos que se emplean, y las reflexiones clave que se desprenden de las experiencias habidas, como ayuda para la mejora de la docencia en titulaciones de ingeniería y arquitectura.

### **3. Materiales, métodos y casos de estudio**

#### **3.1 Asignaturas de planificación energética**

En el curso 1996-1997 comenzó su andadura la asignatura “Planificación Energética”, optativa cuatrimestral del 5º curso de la intensificación en técnicas energéticas de los estudios de ingeniería industrial, con 4 horas semanales de docencia.

Con una metodología docente basada en lección magistral y estudio de casos prácticos, Lara incorporó a la asignatura una serie de conceptos relacionados con la sostenibilidad. Por un lado, se abordó el análisis coste-beneficio como parte del proceso de identificación de proyectos públicos aceptables (Dasgupta y Pearce, 1972), y su aplicación a la evaluación de proyectos de inversión privados. Además de los habituales criterios cuantitativos de economicidad (VAN, TIR), incorporados a la toma de decisiones en el análisis de proyectos de centrales eléctricas, se incluyó también el estudio de impacto ambiental (Estevan Bolea, 1984; Hernández Fernández, 1987). Además, se llamó la atención del alumno acerca de la metodología de planificación de menor coste (ACE, 1991), y de la planificación integrada de recursos (Woolf y Mickle, 1993).

En una segunda fase, en el curso 1999-2000, se introdujo el análisis del ciclo de vida ambiental, social y económico (Vigon, 1994), que completó el marco de referencia necesario para analizar con criterios de sostenibilidad los proyectos de inversión de centrales eléctricas y, con la necesaria adaptación, cualquier otro proyecto de inversión.

Finalmente, en 2000-2001, partiendo de los criterios de decisión enunciados por Vilfredo Pareto en su *Cours d'économie politique* (1896), se introdujo el principio de compensación desarrollado por Nicholas Kaldor en 1939, uno de los fundamentos que sustentan la llamada economía del bienestar.

Las horas lectivas de la asignatura no permitían profundizar en los métodos referidos, pero fue más que suficiente para orientar con una nueva perspectiva los estudios y trabajos a desarrollar en esta y otras disciplinas, y en más de una ocasión resultaron de provecho en el posterior ejercicio profesional de algunos de aquellos alumnos.

En la asignatura de planificación energética se utilizaron como textos básicos el de Kleinpeter (1995) como referencia general, el de García Alonso e Iranzo (1988) para España, y el de Carvalho Neto et al. (1997) para Europa y el resto del mundo, complementados con las necesarias y abundantes actualizaciones anuales, cada vez más accesibles vía Internet.

Al igual que los demás contenidos teóricos de la asignatura, los relacionados con la sostenibilidad llevarían asociados ejercicios y casos prácticos, debidamente adaptados en su general complejidad a la capacitación del alumnado y al tiempo disponible.

Estas prácticas incluían, además de los rutinarios cálculos económicos asociados a las inversiones proyectadas para la construcción, explotación y desmantelamiento de un determinado tipo de central eléctrica, el complemento del análisis de sus efectos ambientales y sociales, y la revisión crítica de posibles opciones de inversión con centrales de tecnología diferente a la propuesta en primer lugar. En estos trabajos se familiarizaba al alumnado con

el empleo de bocetos, planos y mapas. Además, se enseñaba a acceder y consultar la variada información, ya entonces disponible, sobre los detalles de los diferentes procesos involucrados en el tránsito “de la cuna a la tumba” de estos proyectos, desde su concepción y diseño hasta su hipotético desmantelamiento una vez finalizada su vida útil.

Tras el cambio a los planes de estudio de Bolonia, la asignatura del antiguo plan de estudios tuvo prolongación en la asignatura cuatrimestral optativa, también llamada “Planificación Energética”, del 4º curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (GITI) de la UDC. Esta asignatura comenzó en el curso 2013-2014, y tiene una docencia de 3h/semana. Lara mantuvo el temario, resumiendo algunas de sus partes. Empleó la misma metodología docente, haciendo ahora que los alumnos participasen en la docencia, exponiendo los capítulos menos complejos del temario.

La evolución de la docencia de esta asignatura conoció un gran avance –cualitativo y cuantitativo– con la Tesis Doctoral de Cartelle (2018), sobre evaluación de la sostenibilidad de centrales eléctricas, y optimización de sistemas energéticos, en el marco del Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos de la UDC. A pesar de que Lara, de la Cruz y del Caño habían colaborado previamente, fue en este momento cuando se produjo una integración completa entre los trabajos que venían haciendo en áreas de conocimiento diferentes.

Esta colaboración dio lugar a la publicación de diferentes trabajos sobre evaluación y optimización de la sostenibilidad de sistemas energéticos, en revistas internacionales de gran impacto (Cartelle et al. 2015, 2016, 2017, 2018, 2020a, 2020b).

Actualmente, desde el presente curso 2021-2022, Cartelle imparte la asignatura de Planificación Energética del GITI, con los contenidos propuestos por Lara, a los que se ha añadido nuevo contenido relacionado con la sostenibilidad en el sector energético. En particular, se introduce al alumno en la formulación y resolución de problemas actuales de planificación energética, con especial atención a los problemas de expansión de la generación eléctrica, adoptando diferentes enfoques metodológicos como son la formulación y resolución de problemas de optimización multi-objetivo (Deng & Lv, 2020), la utilización de métodos multi-criterio de toma de decisiones (Pohekar & Ramachandran, 2004), la aplicación del ACV, la existencia de modelos IO (*Input-Output*), la generación y evaluación de escenarios, o la posibilidad de emplear la teoría moderna de carteras (Pérez Odeh, Watts & Flores, 2018), entre otras opciones.

Habida cuenta de las limitaciones de tiempo existentes, no es posible profundizar en estos contenidos, si bien el alumno recibe la información de base mínima sobre la que seguir formándose, si en el futuro se dedicase a resolver este tipo de problemas. El estudiante también recibe material adicional que le puede servir para seguir aprendiendo fuera del aula.

Se mantiene metodología docente de Lara, si bien una parte importante de la calificación final depende de la realización de un trabajo, a escoger por el alumno, que se lleva a cabo parcialmente en horario de clase. El profesor tutoriza, resuelve dudas, y proporciona material adicional al alumno. Varios de los trabajos propuestos por el profesor están directamente relacionados con la sostenibilidad en el sector energético. Por ejemplo, uno de los tipos de trabajo tiene como propósito la evaluación de la sostenibilidad de al menos dos tipos de centrales eléctricas mediante el uso de dos o más métodos multi-criterio de toma de decisiones (SAW, AHP, ANP, MIVES, ELECTREE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, MACBETH, ASPID, entre otras opciones).

Otro tipo de trabajo supone realizar una revisión de la literatura especializada sobre diferentes enfoques adoptados en la resolución de problemas de planificación energética en los que se incluya el concepto de sostenibilidad.

Y en un tercer tipo el alumno debe describir detalladamente, y analizar, al menos una herramienta existente de planificación energética. En caso de que dicha herramienta sólo

tenga en cuenta aspectos económicos y técnicos, el alumno debe discutir las opciones reales de incluir objetivos sociales y medioambientales.

Algunos de los contenidos comentados han sido empleados por Lara y Cartelle en cursos de Máster, tanto en la Universidad de Vigo como en la de Santiago de Compostela.

### **3.2 Asignaturas de construcciones industriales**

De forma independiente de lo anterior, en 2000-2001, de la Cruz y del Caño incluyeron los conceptos básicos de la sostenibilidad en la asignatura obligatoria cuatrimestral “Construcción y Arquitectura Industrial” (CAI), de 4º curso del plan de estudios de Ingeniero Industrial de la UDC, que tenía una docencia de 4h/semana. La metodología docente se basaba en la lección magistral, incluyendo debates con los alumnos, y en la realización por los alumnos, en equipo, de un proyecto conceptual o básico de un edificio industrial. En 2006-2007, en el marco de un programa de preparación para los planes Bolonia, se probó el concepto de clase invertida, que se verá más adelante. El resultado fue heterogéneo, con respuesta positiva de un porcentaje importante del alumnado, y rechazo frontal de un pequeño grupo, que prefería la lección magistral. Tras ello se volvió al método anterior.

Por otro lado, a lo largo del tiempo, entre 1996 y 2000, de la Cruz y del Caño habían ido adoptando un enfoque basado en las ideas de Eduardo Torroja (1957), expuestas en su obra “Razón y ser de los tipos estructurales”. Torroja pensaba que en las escuelas de ingeniería “hay tanto que aprender, que rara vez queda tiempo para pensar”, y que no hay que “menospreciar el estudio ontológico de la morfología resistente”. Para acertar en la concepción de cualquier construcción, “es necesario meditar y conocer bien la razón de ser” de los diferentes tipos estructurales, y de su mayor o menor aptitud resistente, “prescindiendo [...] de todo lo que representa un proceso o un valor numérico”. Consideraba que “es un error demasiado corriente empezar a calcular la viga número 1 sin haber antes meditado si la construcción debe llevar vigas, o no”. Los profesores de esta asignatura quisieron ir más allá, y aplicaron estas ideas a todo el temario (materiales de construcción, cerramientos, estructuras, instalaciones), saliéndose de lo meramente estructural.

Pues bien, en esta asignatura, los contenidos iniciales sobre sostenibilidad incluían, primeramente, reflexiones sobre el crecimiento medido en base al Producto Interior Bruto, así como el concepto de desarrollo sostenible del Informe Brundtland. Luego se abordaban, de forma cualitativa, las claves de la sostenibilidad ambiental, social y económica.

Se introducían conceptos de lo que hoy se conoce como economía circular, relacionando las fases de ingeniería y obra con las de uso y desmantelamiento, introduciendo los conceptos de reutilización, reducción de residuos, revalorización, y reciclaje (4R).

En materia de reutilización se empleaban ejemplos relacionados con la estructura metálica, los cerramientos ligeros e, incluso, con edificios enteros. En cuanto a revalorización, se usaban ejemplos basados en la madera estructural de edificios antiguos. Para el reciclaje el ejemplo clave era la estructura metálica, si bien se hablaba también del vidrio y los plásticos.

Tras analizar las posibilidades de la biosfera para cerrar los ciclos materiales, se definía el concepto de material renovable y no renovable, clasificando los principales materiales de construcción en función de ello. Siempre se puso especial cuidado en que el alumno comprendiese que la madera procedente de bosques mal gestionados no es un recurso renovable, introduciendo el concepto de certificación de la madera.

Después se abordaba un ejemplo cuantitativo, propuesto por Natterer (1995, 2002) (Natterer, 1998), comparando las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de energía necesarios para construir una viga isostática, con las mismas cargas y luz estructural, con tres materiales: hormigón armado, acero y madera. Con ello el alumno podía comprender, entre otras cosas, que el acero es menos sostenible ambientalmente que el hormigón armado por unidad de peso, pero

tiene una capacidad resistente mucho mayor, lo cual llevaba, en el ejemplo abordado, a que la estructura de acero fuese ambientalmente ventajosa frente a la de hormigón armado. También podía comprender que una ventaja ambiental podía combinarse con una desventaja económica, en materia de costes de inversión y que, por tanto, todo sistema constructivo tiene ventajas e inconvenientes en materia de sostenibilidad. No obstante, se hacía notar al alumno que existen más aspectos que influyen en la sostenibilidad de un sistema constructivo, además del consumo energético, la emisión de CO<sub>2</sub>, y el coste de inversión.

Un aspecto clave eran las instalaciones, especialmente las energéticas. Se empleaban ejemplos basados en Cuchí (2002), en los cuales se observaba que en edificios residenciales la ratio de consumo de energía durante la construcción, con respecto al uso, era del orden de 1:2. Luego se reflexionaba acerca del consumo energético de una vivienda y de una fábrica o planta industrial, llegándose a la conclusión de que esa ratio podía ser mucho mayor en las construcciones industriales.

Tras ello se introducía al alumno en el concepto de certificación edificatoria en materia de sostenibilidad, a través de un breve resumen del estándar LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) del *US Green Building Council*.

Finalmente se hacían unas recomendaciones cualitativas al alumno, a tener en cuenta al proyectar construcciones industriales, de este estilo:

- Un material, elemento constructivo, o instalación (eléctrica, hidráulica, de climatización) es mejor que otro, si para su fabricación, construcción, uso y desmantelamiento se consumen menos materiales, energía y agua y, en general, se respeta mejor el medio ambiente y la salud humana.
- Los mejores materiales son los renovables. Si no son renovables, por lo menos es deseable que sean reutilizables o reciclables, siendo mejor si son reutilizables.
- Un cerramiento es mejor que otro si aporta un mayor aislamiento térmico y acústico.
- Una edificación es mejor que otra si su orientación (NSEO) y sus sistemas constructivos están pensados para adaptarse mejor al clima de la zona.
- Es mejor lo que economiza en el ciclo de vida, que lo que tiene un precio menor.
- Es mejor lo que mejor protege los intereses de los trabajadores, de los usuarios, de los mantenedores y, en general, de la sociedad.

Todos estos contenidos no ocupaban mucho tiempo de clase, pero se abordaban al principio de la asignatura, y luego se iban recordando en los sucesivos capítulos, cuando se hablaba de estructuras, cubiertas, fachadas e instalaciones de todo tipo, y los alumnos iban haciendo el proyecto ya comentado. En cada momento, se incluían reflexiones acerca de cuáles son los sistemas constructivos que suelen permitir aumentar la sostenibilidad de las construcciones industriales.

En base a ello, si el enunciado del trabajo de curso establecía que el cliente deseaba que su edificio se proyectase con arreglo a criterios de sostenibilidad ambiental, o de reducción de costes del ciclo de vida, el alumno tenía mimbres con los cuales abordar el problema, pues sabía cuál es la razón y ser de cada tipo de sistema constructivo, en general, y también en materia de sostenibilidad. En todo caso, en el examen se tenía que enfrentar a preguntas en las cuales debía manejar los conceptos de sostenibilidad aludidos. Nunca ha sido posible entrar a fondo en la sostenibilidad social, por estar menos estudiada. Sin embargo, siempre se ha reflexionado sobre ello, p. ej., comparando la creación de empleo para realizar un muro de fábrica y uno de hormigón armado.

Al igual que en el caso de la planificación energética, pero en un momento bastante anterior, hubo aquí un avance notable con la participación de dos de los autores en el proyecto para

redactar el Anejo de Sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural (España, 2008), bajo la dirección del Prof. D. Antonio Aguado de Cea, y con la posterior Tesis Doctoral de Gómez López (2012) sobre evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón teniendo en cuenta la incertidumbre. Proyecto y Tesis dieron lugar a publicaciones internacionales en revistas científicas de prestigio (Aguado et al., 2021; Gómez et al. 2012; del Caño et al., 2012, 2016, entre otras). También ha sido de utilidad, en tiempos recientes, la Tesis Doctoral de Castro (2021), sobre modelos no deterministas de evaluación de la sostenibilidad de instalaciones energéticas. Entre estos trabajos y los ya comentados de Cartelle (2018), se ha ido reuniendo un bagaje que ha permitido lo siguiente, en los planes de estudios Bolonia:

- Grado de Ingeniería Mecánica (GIMec).
  - Asignatura “Construcciones Industriales I” (CI1), cuatrimestral obligatoria de 3<sup>er</sup> curso, con docencia de 4h/semana, que comenzó en el curso 2012-2013.
    - de la Cruz y del Caño han mantenido el temario y la metodología docente de la asignatura CAI del antiguo plan de estudios de Ingeniería Industrial, con clase magistral, debates y un proyecto conceptual o básico realizado por los alumnos en clase, con la tutorización del profesor. Por supuesto, se mantiene el enfoque de “razón y ser de los sistemas constructivos” basado en las ideas de Torroja.
    - Para que los alumnos dediquen más tiempo de clase su proyecto, al principio del temario se aborda un resumen de lo ya relatado para la asignatura CAI, en materia de sostenibilidad. En lo esencial, con mejoras continuas anuales de los contenidos, el resto se mantiene igual.
  - Asignatura “Construcciones Industriales II” (CI2), cuatrimestral optativa de 4<sup>o</sup> curso, con docencia de 3h/semana, que comenzó en el curso 2013-2014.
    - Castro y del Caño comenzaron con una metodología docente convencional y un temario de ampliación de la asignatura anterior. En un cambio de planes de estudios, en 2016-2017, la asignatura pasa a ser un taller de trabajo en el cual los alumnos escogían y realizaban un determinado conjunto de pequeños proyectos. Por ejemplo, una estructura sencilla metálica o de hormigón, una instalación de abastecimiento de agua, una de calefacción y una eléctrica. Los profesores no explicaban teoría. Resolvían casos similares a los que tenía que resolver el alumno, y el alumno hacía los proyectos oportunos, fuera del aula.
    - En el curso 2019-2020 la asignatura se orientó más a las necesidades del alumno. Hoy es un taller de trabajo de tipo clase invertida, en el que cada alumno realiza un conjunto de proyectos escogido por él. El estudiante sigue proyectando, calculando y dimensionando sistemas estructurales o instalaciones de tipo diverso, pero ahora escoge individualmente lo que va a hacer, y lo hace en el orden que le interesa. Estudia fuera del aula el material didáctico y los ejemplos resueltos que hay en la web de la asignatura, y luego realiza en el aula el correspondiente conjunto de proyectos, con el apoyo y la supervisión del profesor. A pesar de la posibilidad de uso de software comercial, el alumno aprende primero a calcular a mano (con Excel o calculadora), en la idea clave de que no se debe calcular con ordenador algo que no se sepa calcular a mano.
    - Una de las posibilidades es realizar un ACV ambiental sencillo del diseño, construcción y explotación de centrales eléctricas, basado en valores de inventario

reales de bases de datos comerciales, para hacer comparaciones entre dos tipos de central (p. ej., carbón y nuclear).

- Otra es la construcción de un modelo MIVES (de la Cruz et al., 2015) de integración de resultados de ACVs ambiental, social y económico, para calcular un índice de sostenibilidad integral de centrales de producción de energía renovable, con objeto compararlas entre sí. También se calculan los índices parciales de sostenibilidad ambiental, social y económica. Este trabajo, que es una versión simplificada del plasmado en Cartelle et al. (2015), normalmente se aborda de forma determinista, si bien algún alumno lo ha hecho de forma probabilista, empleando simulación tipo Monte Carlo (de la Cruz et al., 2015).
- Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI).
  - Asignatura “Análisis y Diseño de Estructuras y Construcciones Industriales”, cuatrimestral obligatoria de 3<sup>er</sup> curso, con docencia de 4h/semana, que comenzó en 2012-2013. Sólo se dispone de 1,5 ECTS para la parte de construcciones industriales (1h/semana), y no hay un capítulo sobre sostenibilidad. No obstante, de la Cruz y del Caño aprovechan ese mínimo contenido de la asignatura, relativo al proyecto de naves industriales, para introducir unos conceptos mínimos de la sostenibilidad, y reflexionar al respecto.
  - Asignatura “Construcción de Plantas Industriales y Sistemas Energéticos”, cuatrimestral optativa de 4<sup>o</sup> curso, que comenzó en 2013-2014. Es de aplicación todo lo dicho para la asignatura CI2 del GIMec. Además, por no haber un trabajo de curso de proyecto conceptual o básico en la asignatura obligatoria de 3<sup>o</sup>, se ofrece la posibilidad de realizarlo aquí, pudiendo hacerse en base a criterios de sostenibilidad. Véase lo ya dicho al respecto en las asignaturas CAI del antiguo plan de estudios de ingeniería industrial, y CI1 del GIMec.
- Máster en Ingeniería Industrial (MII).
  - Asignatura “Diseño y Construcción de Complejos Industriales y Empresariales”, cuatrimestral obligatoria de 1<sup>er</sup> curso.
    - Esta asignatura comenzó en 2014-2015 con 4h/semana, cambiando a las actuales 3h/semana en una modificación de plan de estudios que se produjo en 2018-19, manteniéndose el temario, que se centra en la sostenibilidad, la obra gruesa, y el urbanismo industrial. El enfoque que emplean de la Cruz y del Caño es el ya comentado para la asignatura CI1 del GIMec, basado en las ideas de Torroja, pero con contenidos más amplios, detallados y complejos que para los correspondientes capítulos de CI1. La metodología docente se basó en lección magistral, debates con los alumnos, y trabajos o proyectos. No obstante, en el presente curso 2021-2022 se está probando el método de clase invertida.
    - El capítulo de sostenibilidad está al principio de la asignatura y va mucho más allá de la introducción que se hace en los grados. Incluye conceptos generales; el ACV y sus fases; indicadores ambientales, sociales y económicos; método MIVES determinista (ya referido); y recomendaciones cualitativas a tener en cuenta al proyectar complejos industriales y empresariales.
    - Entre los trabajos de la asignatura se incluyen los ya comentados en la asignatura CI2 del GIMec: la realización de un ACV ambiental a partir de valores reales de inventario, y la construcción y uso de un modelo MIVES para calcular un índice de sostenibilidad integral de centrales de producción de energía.
  - Asignatura “Instalaciones”, cuatrimestral obligatoria de 1<sup>er</sup> curso. Esta asignatura comenzó en 2014-2015 con 4h/semana, cambiando a las actuales 3h/semana en la

modificación de plan de estudios de 2018-19, ya aludida. En esencia, el temario se mantuvo. Castro y del Caño emplean un enfoque basado en las ideas de Torroja, ya resumidas, incluyendo criterios de sostenibilidad. El plan de estudios incluye aquí los aspectos de cálculo y dimensionamiento de instalaciones. Por tanto, uno de los aspectos clave es la eficiencia energética.

- Asignatura “Dirección Integrada de Proyectos”, cuatrimestral obligatoria de 2º curso, con 2h/semana. De la Cruz y del Caño incluyeron un capítulo sobre gestión del objetivo de sostenibilidad desde el principio de la asignatura. Comenzó siendo muy sencillo, y ha terminado teniendo tanta entidad como los demás capítulos. Al estar los profesores involucrados en trabajos de investigación sobre sostenibilidad, tenían inquietudes al respecto, y extrañeza de que los principales estándares mundiales apenas trataran este asunto. Este es un ejemplo en el que la docencia lleva a los profesores a trabajos de investigación para mejorar el temario de la asignatura. Los primeros resultados de ello han sido publicados ya en una revista científica (de la Cruz et al., 2021).

### **3.3 Asignatura “Evaluación y optimización de la sostenibilidad de sistemas energéticos”**

Todo el trabajo resumido hasta aquí, desarrollado por todos los autores, que constituyen el Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos de la UDC al completo, permitió la creación de la asignatura cuatrimestral optativa “Evaluación y optimización de la sostenibilidad de sistemas energéticos” del Máster en Eficiencia y Aprovechamiento Energético (MEyAE) de la UDC, con 2h/semana, impartida desde 2016-2017 por Lara y del Caño, y actualmente por Cartelle y del Caño. La metodología docente se basa en lección magistral, debates con los alumnos y trabajos de curso, que cubren todo el temario, y que son realizados en el aula, con la ayuda del profesor. Debido a la actual tendencia de muchas universidades de aceptar la matrícula de alumnos que realmente no conocen el español, esta materia se ha impartido primeramente en español, luego en inglés, e incluso en forma bilingüe, este año.

En esta asignatura se incluye un temario muy completo que abarca todos los contenidos comentados hasta ahora en este escrito, tratados con mayor detalle y complejidad. Por ejemplo, se abordan los conceptos de variabilidad e incertidumbre, entre otras posibilidades, a la hora de estimar el valor de los indicadores; de vaguedad y ambigüedad, cuando se estiman indicadores cualitativos; y de subjetividad y diferencias de opinión, a la hora de establecer las ponderaciones de los indicadores. Se enseña al alumno a resolver estos problemas con planteamientos no deterministas, concretamente con simulación estocástica.

El temario también incluye métodos de optimización de la sostenibilidad basados en los trabajos resumidos en Cartelle (2018). En particular, se recuerda la optimización clásica por derivación y se introducen la búsqueda exhaustiva, la simulación estocástica, el descenso por gradiente, la búsqueda *tabu*, el recocido simulado y los algoritmos genéticos. Para ejercicios y casos prácticos de evaluación y optimización se emplean herramientas informáticas comerciales y software gratuito. Sin tratarse de ello en clase, se suministra información al alumno acerca de cómo programar algunos de los métodos.

## **4. Resultados y principales reflexiones tras 25 años de experiencias.**

Además de los resultados y reflexiones comentados con anterioridad, se incluyen a continuación otros que se consideran de interés.

Algunos alumnos dan importancia, a veces mucha, a los contenidos sobre sostenibilidad. En asignaturas obligatorias algunos estudiantes, no muchos, lo ven más como un contenido no apetecible que deben superar, estando esencialmente atraídos por las facetas meramente

técnicas de la carrera. Un tercer grupo de alumnos tiene ideas intermedias entre ambos extremos, más o menos cercanas a cada extremo comentado.

En el ámbito de la energía, estos contenidos permiten que el alumno tome conciencia de realidades muchas veces interesadamente ocultas, como, por ejemplo, que la energía nuclear no es tan mala opción, ni todas las energías renovables tan buenas, cuando se tienen en cuenta aspectos como la obtención de las materias primas necesarias, la relación entre la producción y la potencia instalada, la ocupación del territorio (incluyendo la minería asociada), o la generación de residuos.

En ingeniería de la construcción, el alumno relaciona las eficiencias estructural y energética con la sostenibilidad ambiental y económica, o los procesos de ejecución de obras con la sostenibilidad social, entre otros aspectos. También se puede dar cuenta de que la sostenibilidad es muy compleja, y que la comparación de sistemas constructivos en base a su sostenibilidad necesita de un método de integración de indicadores, ya que cada alternativa tiene sus ventajas e inconvenientes. A veces las consideraciones sobre sostenibilidad ayudan a comprender conceptos esencialmente técnicos en materia de cerramientos, estructuras e instalaciones.

En general, en cualquier asignatura, algunos alumnos vienen con la idea de que lo esencial es lo medioambiental, otros que lo social, y otros que lo económico. Al final de cada asignatura el alumno suele tener claro que los tres aspectos son muy importantes, y que las posibles diferencias en ponderación no deben ser elevadas. En la práctica totalidad de los casos, a veces tras un intenso debate, terminan considerando que lo más importante es lo ambiental, resumidamente, porque si acabamos con la vida humana no habrá sociedad ni, por tanto, economía. Por razones análogas, terminan estando de acuerdo en que lo social (en realidad, lo socio-económico) es más importante que lo meramente económico.

El concepto de ciclo de vida y su importancia suele quedar claro para todos los alumnos, sin dificultades reseñables. Los alumnos de Máster en Ingeniería Industrial tienen más facilidad para comprender los conceptos y métodos impartidos que los alumnos de grado, debido a su formación previa. Sin embargo, el MEyAE supone una complejidad especial. Se accede a él con titulaciones previas muy variadas, muchas de ellas cursadas fuera de España. Los alumnos tienen una base previa muy heterogénea. El resultado es que a veces es bastante difícil que algunos alumnos comprendan las partes más complejas de la materia, debido a su incompleta formación matemática de base. Incluso alumnos con estudios previos de ingeniería de 5 años han olvidado parte de su formación matemática, y han manifestado que estos asuntos han sido los que les han planteado más dificultad, si bien suele tratarse de alumnos que terminaron sus estudios hace muchos años y en su trabajo profesional no han empleado el tipo de matemáticas que se usa en los contenidos referidos. Este problema se agudiza en el caso de algunos alumnos que ni siquiera entienden el español, mientras que cuando se habla en inglés hay algunos hispanohablantes que tienen problemas de comprensión. Esto se trata de paliar con una Web bilingüe (apuntes, casos prácticos, etc.), e impartiendo la materia en los dos idiomas, pero incluso así hay problemas, porque algunos alumnos extranjeros tampoco dominan el inglés. Además de lo anterior, las consecuencias de la pandemia, y especialmente las evaluaciones realizadas en modo virtual con herramientas inadecuadas, están pasando factura en estos momentos, y pueden a seguir haciéndolo durante unos años.

Los alumnos aprecian más la parte práctica que la teórica. Sin embargo, es frecuente que entren con gusto en los debates que se producen en las clases teóricas, que siempre se explican a base de ejemplos, mayoritariamente reales. Muchos estudiantes han mostrado gran satisfacción acerca de los debates que suscitan los profesores, en los cuales se plantea una pregunta (p. ej., ¿qué es más importante?, ¿lo ambiental, lo social o lo económico?), y se

les deja debatir sin grandes trabas de tiempo, con el profesor moderando el debate y sin aportar su opinión hasta los momentos finales.

En asignaturas optativas evaluadas por proyectos y trabajos escogidos por el alumno, éste aprecia mucho la docencia invertida, previamente resumida, porque la parte teórica, que incluye casos resueltos, tiene siempre un soporte suficiente como para poder ser estudiada en casa, y de esta forma el estudiante realiza los trabajos en clase, viendo resueltas sus dudas de forma inmediata, a diferencia de lo que ocurre cuando hace trabajos en casa. Se sobreentiende que las dudas sobre los contenidos teóricos son resueltas en clase antes de que el alumno realice su proyecto. En asignaturas obligatorias los autores acaban de comenzar a probar la docencia invertida, y todavía no pueden hacer afirmación alguna.

En todos los casos, el alumno aprecia mucho que su proyecto o trabajo, además de ser tutelado por el profesor, sea revisado al completo antes de su entrega definitiva. En opinión de los autores, esto tiene ventajas e inconvenientes para alumno y profesor. Las del profesor son claras, con un mayor índice de éxito, mejores calificaciones y más trabajo de tutela y corrección. Las del alumno no lo son tanto para él. En algunas empresas, suficientemente grandes, van a tener a un ingeniero con experiencia que va a hacer una labor parecida a la del profesor, asegurándose de que su trabajo es bueno, antes de entregárselo al cliente. Pero en muchas PYMES esto no ocurre, y el egresado se encuentra sólo ante sus retos profesionales. Por tanto, es probable que las antiguas carreras de ingeniería, en las cuales los alumnos se encontraban solos ante sus desafíos de aprendizaje, les preparasen mejor para estas situaciones, y para otras parecidas.

En unas carreras que tradicionalmente no dedicaban tiempo a la formación humanista del ingeniero, los contenidos de sostenibilidad introducen al alumno en este campo, y los autores consideran que esto es más que bueno; piensan que la formación del ingeniero es mejor si incluye estos asuntos. Consideran, además, que todo lo expuesto en esta comunicación ha permitido el enriquecimiento de profesores y alumnos, y la preparación de estos últimos para los problemas a los que se están enfrentando empresas y administraciones públicas, relacionados con la sostenibilidad.

#### 4. Referencias

- Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M. P., Gómez, D., & Josa, A (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138, 268-276. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000419.
- Association for the Conservation of Energy (ACE). (1991). *Least-Cost Planning in the European Community*. Directorate General for Energy. Luxembourg: Commission of European Communities.
- Bouvier, L. F., & Grant, L. (1994). *How many Americans? Population, immigration and the environment*. San Francisco, CA, USA: Sierra Club Books.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., & del Caño Gochi, A. (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy*, 89, 473-489. doi: 10.1016/j.energy.2015.05.110.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., & del Caño Gochi, A. (2016). Probabilistic life-cycle cost analysis for renewable and non-renewable power plants. *Energy*, 112, 774–787. doi: 10.1016/j.energy.2016.06.098.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., & del Caño Gochi, A. (2017). Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants. *Energy*, 139, 542-554. doi: 10.1016/j.energy.2017.08.025.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., & del Caño Gochi, A. (2018). Sustainability optimisation of shell and tube heat exchanger, using a new integrated

- methodology. *Journal of Cleaner Production*, 200, 552-567. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.266.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., del Caño Gochi, A., & Soares, I. (2020). Probabilistic multicriteria environmental assessment of power plants: A global approach, *Applied Energy*, 260, 114344. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114344.
- Cartelle Barros, J. J. (2018). *Assessing and optimising the sustainability objective of electricity generation systems, and energy systems of special interest to Galicia*. Tesis doctoral, Universidade da Coruña, A Coruña, España. Disponible en <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/20797>.
- Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., del Caño Gochi, A., & Soares, I. (2020). Optimisation Techniques for Managing the Project Sustainability Objective: Application to a Shell and Tube Heat Exchanger. *Sustainability*, 12, 4480. doi: 10.3390/su12114480.
- Castro, A. (2021). *Modelos no deterministas de evaluación de la sostenibilidad de instalaciones energéticas edificatorias*. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña, A Coruña, España.
- Cuchí, J. (2002). Construcción, arquitectura y sostenibilidad. *Seminario: La construcción en el siglo XXI*. Ferrol: Universidad Internacional Menéndez y Pelayo (UIMP) y Universidade da Coruña.
- Dasgupta, A. K., & Pearce, D. W. (1972). *Cost-Benefit Analysis*. New York, NY, USA: Barnes and Noble.
- Deng X., & Lv T. (2020). Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118962. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118962.
- de la Cruz, M. P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., & Cartelle, J. J. (2015). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method. En M. S. García-Cascales, J. M. Sánchez-Lozano, A. D. Masegosa, & C. Cruz-Corona (Eds.), *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Efficiency Energy*, (pp. 69-106). IGI Global.
- de la Cruz, M. P., Cartelle, J. J., del Caño, A., & Lara, M. (2021). New approach for managing sustainability in projects. *Sustainability*, 13, 7037. doi: 10.3390/su13137037.
- del Caño, A., de la Cruz, M. P., Gómez, D., & Pérez, M. (2016). Fuzzy method for analysing uncertainty in the sustainable design of concrete structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22, 924-935. doi: 10.3846/13923730.2014.928361.
- del Caño, A., Gómez, D., & de la Cruz, M. P. (2012). Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures. A probabilistic method. *Construction & Building Materials*, 37, 865–873. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.020.
- España. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-2008). *Boletín Oficial del Estado*, 22 de agosto de 2008, núm. 203, pp. 35176-35178. Anejo 13 de dicha Instrucción, pp. 487-504.
- Estevan Bolea, M. T. (1984). *Evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Fundación MAPFRE.
- García Alonso, J. M., & Iranzo Martín, J. E. (1988). *La energía en la economía mundial y en España*. Madrid: Editorial AC.
- Gómez López, D. (2012). Proyecto sostenible de estructuras de hormigón. Evaluación de la sostenibilidad teniendo en cuenta la incertidumbre. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña, A Coruña, España.
- Gómez, D., de la Cruz, M. P., del Caño, A., & Arroyo, I. (2012). Herramienta de cálculo para la evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón según la instrucción española EHE-08. *Dyna*, 87, 180-189. doi: 10.6036/4391.
- Hernández Fernández, S. (1987). *Ecología para ingenieros: el impacto ambiental*. Madrid: A-Z Ediciones y Publicaciones.
- Kleinpeter, M. (1995). *Energy Planning and Policy*. Chichester, England, UK: John Wiley & Sons.

- Carvalho Neto, J., Lecloux, M., De Gottal, J. N., & Traynor, J. (1997). *Energy in Europe, 1993 Annual Energy Review*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York, NY, USA: Universe Books.
- Mishan, E. J. (1967). *The Costs of Economic Growth*. London, England, UK: Staples Press Ltd.
- Natterer, J. (1995). *Dépense énergétique et émission de CO<sub>2</sub> pour la fabrication d'une poutre simple*. Laboratoire de Construction en Bois (IBOIS) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Natterer, J. (2002). Naturel et construit, le bois cumule les vertus. *Tracés: bulletin technique de la Suisse romande*, 12, 26-32.
- Natterer, J., Herzog, Th., & Volz, M. (1998) *Construire en Bois 2*. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse.
- Pérez Odeh, R., Watts, D., Flores, Y. (2018). Planning in a changing environment: Applications of portfolio optimisation to deal with risk in the electricity sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3808–3823. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.089.
- PNUD (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en acción*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Disponible en <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 365–381. doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007.
- Torroja, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- United Nations, (1987). *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. Oxford, England, UK: Oxford University Press.
- United Nations, (1992). The Rio Declaration on Environment and Development. *The United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)*. Rio of Janeiro, Brazil.
- Vigon, B. W. (1994). *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Woolf, T., & Mickle, C. (1993). *Integrated resource planning: making electricity efficiency work in Europe*. Amsterdam: Greenpeace International.

### Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

