



# Papeles de Energía

Nº12

Febrero 2021

**Red MENTES: red temática  
de modelización energética para  
una transición energética sostenible**

# Papeles de Energía

## EDITOR

Pedro Linares

## CONSEJO EDITORIAL

Claudio Aranzadi, Pablo Arocena, Laura Díaz Anadón,  
Gonzalo Escribano, M.<sup>a</sup> Paz Espinosa, Natalia Fabra,  
Dolores Furió, Tomás Gómez San Román,  
Xavier Labandeira, Juan Luis López Cardenete,  
Mariano Marzo, Carlos Ocaña, Ignacio Pérez Arriaga,  
Desiderio Romero, Gonzalo Sáenz de Miera, Antonio Soria.

**Papeles de Energía** no se solidariza necesariamente con las opiniones, juicios y previsiones expresadas por los autores de los artículos incluidos en la publicación, ni avala los datos que estos, bajo su responsabilidad, aportan.

Edita: **Funcas**

Caballero de Gracia, 28. 28013 Madrid

Diseño y maquetación: **Funcas**

Impresión: **Cecabank**

ISSN: 2530-0148

ISSN: 2445-2726

Depósito Legal: M-7537-2016

© Funcas

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como la edición de su contenido por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, electrónico o mecánico, especialmente imprenta, fotocopia, microfilm, *offset* o mimeógrafo, sin la previa autorización escrita del editor.

## PATRONATO

Isidro Fainé Casas (Presidente)

José María Méndez Álvarez-Cedrón (Vicepresidente)

Fernando Conlledo Lantero (Secretario)

Carlos Egea Krauel

Miguel Ángel Escotet Álvarez

Amado Franco Lahoz

Manuel Menéndez Menéndez

Pedro Antonio Merino García

Antonio Pulido Gutiérrez

Victorio Valle Sánchez

Gregorio Villalabeitia Galarraga



# Índice

- 3 La Red MENTES: red temática de modelización energética para una transición energética sostenible**
- 11 Grupo de investigación de Economía, Energía y Medioambiente (GEAR), Universidad de Castilla-La Mancha. Modelo *input-output* multirregional ampliado**  
Luis Antonio López, Jorge Zafrilla y María Ángeles Cadarso
- 23 Basque Center for Climate Change (BC3). Modelo DENIO: modelo Dinámico Econométrico Neokeynesiano *Input-Output* para España**  
Iñaki Arto, Kurt Kratena, Xaquín García-Muros, Ignacio Cazcarro y Mikel González-Eguino
- 33 Institute for Advanced Research in Business and Economics (INARBE), Universidad Pública de Navarra (UPNA). Modelos de estimación de eficiencia y modelos de equilibrio general aplicado**  
Pablo Arocena y Antonio G. Gómez-Plana
- 39 Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDs), Universidad de Valladolid. Modelo MEDEAS**  
Íñigo Capellán-Pérez, Ignacio de Blas, Jaime Nieto, Margarita Mediavilla, Carlos de Castro, Óscar Carpintero, Luis Fernando Lobejón, David Álvarez-Antelo, Noelia Ferreras-Alonso, Gonzalo Parrado, Fernando Frechoso, Carmen Duce-Díaz y Luis Javier Miguel

- 47 Unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía. Modelo PICASO**  
Zaira Navas-Anguita y Diego Iribarren
- 51 Unidad de Análisis de Sistemas de CIEMAT. Marco FISA y modelo TIMES-Spain**  
Yolanda Lechón y Santacruz Banacloche
- 59 Grupo de Investigación en Crecimiento, Demanda y Recursos Naturales (CREDENAT), Universidad de Zaragoza. Modelo EDISON\*, tablas y modelos *input-output* con desagregaciones energéticas para el análisis de políticas**  
Raquel Langarita, Cristina Sarasa, Julio Sánchez-Chóliz, Rosa Duarte, Ana Serrano e Ignacio Cazarro
- 69 Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Universidad Pontificia Comillas – ICAI. Modelos para el sector eléctrico y el sector energético**  
Andrés Ramos, Alberto Campos, Álvaro Sánchez, Carlos Mateo, Fernando de Cuadra, Pedro Linares
- 91 TECNALIA Research and Innovation. Herramienta ENERKAD, modelo LEAP**  
Diego García-Gusano, Eneko Arrizabalaga y Patxi Hernández

# La Red MENTES: red temática de modelización energética para una transición energética sostenible

Los compromisos adoptados por España en materia de cambio climático, tanto en el marco del Acuerdo de París (por el cual se estableció un acuerdo a nivel mundial para limitar el calentamiento global por debajo de los 2° C en 2100), como en el seno de la Unión Europea, requieren una transformación profunda de toda la economía, y en particular del sector energético, que debe evolucionar hacia un nuevo modelo totalmente descarbonizado. Este proceso de transición, ya planteado por el Gobierno español en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y en la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050, requiere desplegar políticas de amplio alcance, así como incorporar los avances tecnológicos que se van produciendo a nivel global. A su vez, estos cambios políticos y tecnológicos tendrán un impacto significativo en la economía, el medio ambiente, y la sociedad de nuestro país.

Es fundamental pues tomar las decisiones estratégicas asociadas al proceso de descarbonización de la economía con todo el rigor posible, así como evaluar correctamente las implicaciones económicas, sociales y medioambientales de las mismas, de forma que resulten en el mayor bienestar posible para el país. Esto requiere contar con herramientas de modelización apropiadas y adaptadas a la realidad energética de nuestro país.

Existen muchas herramientas disponibles, pero pocas de ellas se han aplicado de forma regular en la planificación energética hasta la fecha. El objetivo de este número es, con la colaboración de la red MENTES (<https://redmentes.es/>) y los equipos que la integran, presentar las herramientas de modelización energética desarrolladas por investigadores españoles, y que pueden estar a disposición de instituciones y empresas de nuestro país para realizar análisis de escenarios de transición energética.

La Red MENTES: red temática de modelización energética para una transición energética sostenible

El objetivo de la red MENTES es poner en contacto a los grupos de investigación nacionales que, desde distintos ángulos y aproximaciones metodológicas, trabajan en modelización energética para:

- Explotar las sinergias y complementariedades existentes entre los distintos grupos que conformarían la red.
- Alinear las prioridades de investigación de los distintos grupos de forma que se adapten y den respuesta a las necesidades y desafíos del país en materia de transición energética.
- Constituir un grupo de referencia a nivel nacional en modelización energética que pueda apoyar a los decisores políticos y agentes involucrados en la toma de decisiones.
- Favorecer la creación de capacidades en materia de modelización energética en nuestro país a través de actividades de formación organizadas conjuntamente por la red, mediante la codirección de tesis doctorales y a través de estancias breves de doctorandos y estudiantes de máster en centros de la red.
- Reforzar la presencia internacional de los grupos de investigación nacionales a través de la participación en redes o iniciativas supranacionales.
- Participar en proyectos de I+D+i nacionales e internacionales conjuntamente.
- Transmitir a la sociedad los resultados de las líneas de investigación de la red, como los impactos que tendrá la transición energética y las alternativas de política económicas existentes para su adaptación.

La red está formada por nueve equipos de investigación: el Global Energy and Environmental Economics Analysis Research Group (GEAR) de la Universidad de Castilla-La Mancha, que actúa como coordinador; el grupo Low Carbon Society Research Line del Basque Centre for Climate Change (BC3); el equipo del Institute for Advanced Research in Business and Economics (INARBE) de la Universidad Pública de Navarra; el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de

Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid; la Unidad de Análisis de Sistemas (UAS) de la Fundación IMDEA Energía; la Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos del CIEMAT; el grupo Crecimiento, Demanda y Recursos Naturales (CREDENAT) de la Universidad de Zaragoza; el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comilla, y el grupo de Planificación Energética de Tecnalía.

Cada grupo de investigación presenta en este número las herramientas de modelización energética que tiene a su disposición, incluyendo ejemplos de aplicación. Como podrá verse, el abanico de modelos disponibles es muy amplio, desde aquellos que permiten el análisis de la operación de corto plazo de los sistemas eléctricos (algo fundamental en un contexto de penetración masiva de las energías renovables) a los que estudian el impacto social, económico y ambiental, incluyendo el comercio internacional, como los modelos *input-output* multirregionales (MRIO) o los modelos de evaluación integrada (IAM). Otros modelos disponibles son los de simulación de la operación y planificación de sistemas eléctricos (incluyendo tanto generación como transporte y distribución); modelos de análisis de eficiencia y productividad; modelos de proyección de demanda energética; modelos de equilibrio general aplicado; análisis de ciclo de vida; modelos de prospectiva energética; o modelos dinámicos econométricos no keynesianos.

Los modelos de proyección de demanda (*demand forecasting*), en este caso centrados en demandas de tipo energético, son modelos matemáticos de especial relevancia en multitud de análisis prospectivos. En dichos análisis, la necesidad de diseñar sistemas producción-demanda hace que el primer aspecto a considerar sea la introducción de las proyecciones de demanda. La creciente complejidad de los sistemas energéticos o la aparición de fenómenos estructurales como el desacople energía-economía, hace necesario el uso de modelos de proyección de demanda que ayuden a los modelizadores energéticos, planificadores y decisores políticos, a establecer escenarios de necesidades. Para ello, existen varios tipos de modelos de proyección de demandas energéticas como son: las series temporales, los modelos de regresión, los modelos econométricos, los análisis de descomposición, los modelos tipo ARIMA, las redes neuronales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos y/o los modelos autorregresivos. En la mayoría de casos, las modelizaciones se adaptan al tipo de análisis que se espera llevar a cabo: análisis de prospectiva

La Red MENTES: red temática de modelización energética para una transición energética sostenible puro, utilización de dichas proyecciones en otros modelos, evolución de variables asociadas a la demanda (emisiones, costes, etc.). Por todo lo anterior, es reseñable la importancia que dichos modelos de proyección de la demanda están empezando a adquirir en el diseño avanzado de modelos energéticos de optimización (MARKAL/TIMES, LEAP, MESSAGE, PRIMES...), tradicionalmente usados a escala nacional por los organismos gubernamentales.

Los modelos de análisis frontera para el análisis de la eficiencia y productividad son metodologías que permiten la estimación de distintas dimensiones relacionadas con la eficiencia productiva (y, en general, con diversas medidas de desempeño o *performance*), así como la identificación de sus fuentes y determinantes. Estas metodologías se agrupan fundamentalmente en dos familias genéricas: el análisis de fronteras estocásticas (basado en modelos econométricos) y el *Data Envelopment Analysis* (basado en modelos de programación lineal). El objetivo es la estimación de una frontera de producción (o de costes) a partir de las mejores prácticas observadas. Esa frontera sirve como referencia para el resto de unidades que se analizan, de tal forma que la medida de la *performance* de una unidad (una empresa, una región, un país) viene definida por su distancia a esa frontera. Estas metodologías resultan especialmente útiles para la estimación de la (in)eficiencia energética y medioambiental, permitiendo cuantificar las posibilidades de mejora en la utilización de los recursos y la reducción de emisiones.

Los modelos de simulación del sector eléctrico son también muy relevantes para evaluar las consecuencias de la transición, ya que dicho sector es uno de los más afectados, y además, su representación es compleja desde el punto de vista técnico. Existen distintas escalas de modelado, que contemplan desde los modelos de planificación de largo plazo, que permiten analizar decisiones de inversión; los modelos de coordinación hidrotérmica, generalmente multianuales, necesarios para determinar la gestión óptima de las reservas hidráulicas; o los modelos de operación o despacho, que representan generalmente con gran nivel de detalle técnico la operación del sistema. La creciente entrada de las energías renovables variables en la generación eléctrica ha supuesto un reto adicional para este tipo de modelos, al requerir una representación más detallada de las restricciones técnicas de operación, así como de la variabilidad de la producción renovable.

También son particularmente útiles en este contexto los modelos de simulación del transporte, en particular del transporte por carretera. Modelos como TREMOVE o TRENEN son referencia habitual en los análisis de la transición energética a nivel europeo. Tanto a escala regional, como a nivel urbano, estos modelos permiten representar la evolución de la oferta y la demanda de movilidad, y sus consecuencias económicas, energéticas o ambientales. En este ámbito el reto fundamental es la introducción en estos modelos de nuevos modos de transporte, en particular el *car-sharing* o el *car-pooling*, y eventualmente, la utilización de vehículos autónomos.

Los modelos energéticos de optimización, del tipo por ejemplo de los modelos TIMES desarrollados por el Programa de Colaboración Tecnológica ETSAP de la Agencia Internacional de la Energía, son herramientas fundamentales para la representación y el análisis de sistemas energéticos complejos a medio y largo plazo que proporcionan, desde un punto de vista coste-eficiente, soluciones sobre la composición óptima del sistema energético teniendo en cuenta los compromisos medioambientales y la demanda energética. Son modelos de tipo *bottom-up* que combinan una aproximación técnica y una aproximación económica. Por el lado del suministro de energía, comprende la extracción de combustibles, la producción primaria y secundaria, y la importación y exportación energética. Los “agentes” de la oferta energética son los “productores”. La demanda energética se estructura sectorialmente en sectores residencial, comercial, agrícola, de transporte e industrial. Los “agentes” del lado de la demanda de energía son los “consumidores”. Las relaciones matemáticas, económicas y de ingeniería entre estos “productores” de energía y “consumidores” son la base que sustenta los modelos TIMES. Estos modelos pueden ser muy útiles en la planificación energética a medio y largo plazo y están siendo usados por numerosos países para la preparación de sus estrategias energéticas y de cambio climático. De hecho, una versión modificada del modelo Times–Spain desarrollado por CIEMAT, el modelo TIMES-Sinergia es el que está usando actualmente el Ministerio de Transición Ecológica para la realización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).

Los modelos *input output* y en especial los modelos *input-output* multirregionales (*multiregional input-output models*, MRIO) son una herramienta muy útil

La Red MENTES: red temática de modelización energética para una transición energética sostenible para analizar la sostenibilidad en sentido amplio de las actividades productivas, incluyendo la energía, teniendo en cuenta dimensiones de las tres esferas de la sostenibilidad: económica, social y medioambiental, en lo que se ha venido a llamar modelos *input-output* extendidos. El análisis *input-output* (AIO) es una herramienta única para representar de forma completa los flujos e interrelaciones de sectores y países que forman la compleja red de las cadenas globales de la producción a nivel mundial. Por este motivo, el AIO es considerado como el más apropiado para el cálculo de emisiones basadas en el consumo o huellas de carbono, ámbito este en el que los modelos MRIO se han convertido en la norma de cálculo. La visión sistémica del AIO es fundamental en relación con el cambio climático para evaluar estrategias de mitigación de carácter intersectorial frente a otras más centradas en sectores específicos o tecnologías individuales, junto con la identificación de los cobeneficios o efectos colaterales adversos, sinergias y *trade-offs*, que puedan producirse. Además, el carácter flexible del AIO permite combinarlo con otros modelos, como se comenta a continuación.

Los modelos de equilibrio general (MEGA o CGE, en inglés) son capaces de evaluar endógenamente las interacciones entre los distintos mercados de bienes y factores que existen en una economía. Permiten la simulación de cambios puntuales en las decisiones de política económica, de uso de la tecnología y de comportamiento de la demanda, así como representar en detalle la relación entre las tecnologías utilizadas y las fuentes energéticas requeridas, o la cuantificación del volumen de emisiones contaminantes o de gases de efecto invernadero. Por ello, su papel como modelos de simulación está ampliamente reconocido en el ámbito energético y medioambiental. Presentan una aproximación que permite detectar cómo un cambio en un sector o en un agente concreto de un país, u otra área geográfica, puede afectar al conjunto de la economía representada. Los modelos evalúan endógenamente los cambios en precios y cantidades, y están sujetos a restricciones de carácter tecnológico y de dotación de factores de la economía.

Los modelos dinámicos econométricos neokeynesianos representan un híbrido entre los modelos anteriores (*input output* econométrico y CGE). Se trata de modelos con elevado detalle en términos de sectores, productos y hogares que permiten analizar los impactos económicos de diferentes esce-

narios y políticas en variables como el empleo, PIB, balanza comercial o la distribución de renta.

Finalmente, los modelos basados en dinámica de sistemas son una alternativa a los modelos econométricos de equilibrio general en los que las relaciones de realimentación, los retardos y otras posibles funciones no lineales permiten ofrecer una visión dinámica, integrada y comprensible de sistemas complejos.

Las siguientes páginas presentan en mayor detalle cada una de las herramientas desarrolladas por los grupos de la red en estos ámbitos.



# Grupo de investigación de Economía, Energía y Medioambiente (GEAR), Universidad de Castilla-La Mancha. Modelo *input-output* multirregional ampliado

Luis Antonio López, Jorge Zafrilla y María Ángeles Cadarso\*

## 1. OBJETIVO DE LA HERRAMIENTA Y APLICACIONES PREFERENTES

El siglo XXI es un siglo de grandes desafíos que, además, tienen una escala global y que no pueden ser abordados sin ella. Conseguir sociedades y estilos de vida más justos y sostenibles está en el centro de estos desafíos y a ello contribuyen los objetivos de desarrollo sostenible o el Acuerdo de París, en el ámbito del cambio climático. Para todo ello, es necesario acometer un proceso de transición energética.

Los modelos *input-output* y en especial los modelos *input-output* multirregionales (*multiregional input-output models*, MRIO) son una herramienta muy útil para analizar la sostenibilidad en sentido amplio de las actividades productivas, incluyendo la energía, teniendo en cuenta dimensiones de las tres esferas de la sostenibilidad: económica, social y medioambiental, en lo que se ha venido a llamar los modelos *input-output* extendidos. El análisis *input-output* (AIO) cuantifica las interrelaciones que se producen entre los sectores de una economía y las relaciones de estos con la demanda final y con la generación de valor añadido, internamente, pero también con el exterior a través de importaciones y exportaciones intermedias y finales. Estas, además, en los modelos multiregionales están desagregadas por país y sector de origen y destino. Esto hace que el AIO sea una herramienta única para representar de forma completa los flujos e interrelacio-

---

\* Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Castilla-La Mancha.

nes de sectores y países que forman la compleja red de las cadenas globales de la producción a nivel mundial. Por este motivo, el AIO es considerado como el más apropiado para el cálculo de emisiones basadas en el consumo (*consumption-based accounting*) o huellas de carbono, ámbito este en el que los modelos MRIO se han convertido en la norma de cálculo [1].

El potencial del AIO se desarrolla plenamente en los modelos MRIO, cuyo uso ha crecido de la mano del desarrollo de diversas bases de datos *input-output* multirregionales (como WIOD, EORA, EXIOBASE, GTAP) [2] [3]. Entre las fortalezas del AIO se encuentran su visión sistémica, su capacidad de trazar los impactos a través de las cadenas globales de la producción y de identificar los nexos entre los impactos económicos y medioambientales. La visión sistémica es fundamental en relación con el cambio climático para evaluar estrategias de mitigación de carácter intersectorial frente a otras más centradas en sectores específicos o tecnologías individuales, junto con la identificación de los cobeneficios o efectos colaterales adversos, sinergias y *trade-offs*, que puedan producirse. Además, el carácter flexible del AIO permite combinarlo con otros modelos, como el análisis de ciclo de vida o modelos de equilibrio general computable, en la priorización de actuaciones, identificación de puntos clave o drivers o para el desarrollo de escenarios en relación con cambios tecnológicos, de consumo o de políticas.

## 2. DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN CUALITATIVA, FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESQUEMÁTICA, TIPOS DE DATOS NECESARIOS, Y ENLACES A LA DOCUMENTACIÓN RELEVANTE

El modelo *input-output* multiregional parte de considerar las relaciones intersectoriales que tienen lugar entre un sector y el resto de los sectores de la economía del propio país y del resto de países que utiliza *inputs* de estos para producir y abastecer las demandas de *inputs* que otros sectores ejercen sobre él a su vez y la demanda final. Estas relaciones intersectoriales proporcionan la forma de producir (su tecnología) de cada sector y se recogen en términos unitarios (por millón de euros de producción, por ejemplo) en la matriz A de coeficientes técnicos. La demanda final ( $y$ ) que incluye el consumo final de las familias, el del sector

público, la inversión y las exportaciones. A partir de aquí la producción ( $x$ ) puede expresarse como la suma de producción para uso intermedio ( $Ax$ ) más la producción para uso final ( $y$ ).

$$x = Ax + y \quad [1]$$

Si despejamos el nivel de producción necesario para atender la demanda final que es considerada exógena, tenemos la expresión:

$$x = (I - A)^{-1} y \quad [2]$$

Donde  $(I - A)^{-1}$  es la matriz Inversa de Leontief que actúa como un multiplicador que proporciona la producción total, directa e indirectamente necesaria en todos los sectores de todo el mundo para que una unidad de cualquier producto pueda ir destinada a abastecer la demanda final. La demanda final por tanto actúa como el nivel de activación de la producción de la economía. En el modelo extendido se incorporan factores de impacto (valor añadido, empleo, emisiones), uso de recursos (tierra, agua) de forma que obtenemos la expresión:

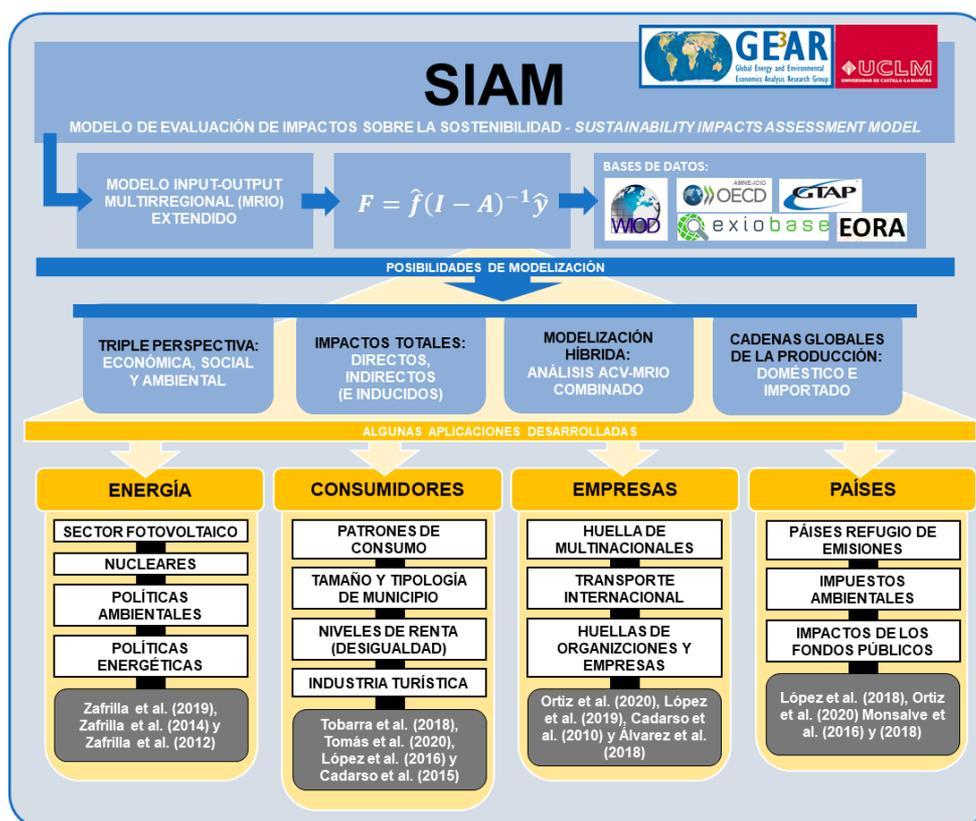
$$F = \hat{f} (I - A)^{-1} \hat{y} \quad [3]$$

Donde el producto entre esos factores de impacto y la inversa de Leontief mide el impacto total (social, económico o medioambiental, según sea el objeto de estudio) en cada sector en cada región/país por unidad de producción realizada que pueda ir destinada a satisfacer la demanda final (donde ambos, demanda final y factor de impacto, están diagonalizados, indicado con  $\hat{\phantom{x}}$ , para poder obtener los multiplicadores y los resultados en forma matricial). Esta última circunstancia proporciona más riqueza de resultados y permite más profundidad en el análisis sin necesidad de incorporar información estadística adicional (Cadarso *et al.*, 2012).

Esta es la base de nuestros modelos donde en función de los objetivos perseguidos se modifican no solo los factores de impacto, sino también la tecnología o los elementos de la demanda final, así como se pueden plantear modelizaciones de carácter híbrido junto con modelos de análisis ciclo de vida (ACV). Este tipo

Figura 1

## Esquema resumen del modelo SIAM



de modelizaciones permite cubrir un amplio espectro de aplicaciones, a las que denominaremos bajo el acrónimo SIAM (figura 1), dependiendo de las casuísticas y necesidades que se nos presenten.

### 3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La herramienta desarrollada ha sido utilizada para llevar a cabo numerosos trabajos científicos que nos han permitido evaluar la sostenibilidad ambiental y energética, económica y social de diferentes agentes económicos. Si nos centramos en las decisiones que toman los distintos agentes económicos, los estudios realizados se han ocupado de analizar las decisiones de personas, hogares, distintos tipos de

empresas, instituciones como las universidades o los distintos fondos europeos. Si prestamos atención al tipo de territorio donde se produce la actuación, los impactos se analizan para ciudades, regiones, países o grupos de países. Si fijamos nuestra mirada en la actividad económica realizada, los trabajos se han centrado en analizar el consumo de los hogares, las decisiones de consumo e inversión en el sector turístico, las decisiones de inversión en el sector eléctrico o el impacto del comercio internacional de bienes y servicios. Algunos de estos ejemplos se describen a continuación.

### 3.1. Energía

*¿Por qué es beneficiosa la inversión en plantas fotovoltaicas, aunque se importen la mayor parte de los paneles solares?* El cumplimiento de los objetivos de París en la lucha contra el cambio climático y la consecución de una economía sostenible reclama la descarbonización del sector energético y, en esta, la energía fotovoltaica está llamada a tener un papel clave. En el trabajo (Zafrilla *et al.*, 2019) se analiza desde la triple perspectiva de la sostenibilidad el impacto del sector fotovoltaico en España. Los beneficios que genera el sector fotovoltaico van más allá de permitir un *mix* más renovable y con menos emisiones que, además, ayudan a la descarbonización de otros sectores y se difunde por toda la economía. También evita emisiones que se habría producido con fuentes fósiles, genera valor añadido y empleo de calidad. Las importaciones del sector suponen que parte del impacto tenga lugar fuera de las fronteras, pero, aun así, las fugas de generación de renta son menores que la renta generada dentro de España.

Otras preguntas relativas al sector energético a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué no son nulas las emisiones de carbono de la energía nuclear? (Zafrilla *et al.*, 2014). ¿Por qué la política ambiental sólo explica en parte el cumplimiento de España de los objetivos del Protocolo de Kioto? (Zafrilla *et al.*, 2012).

### 3.2. Consumidores

*¿Por qué consumir frutas y verduras locales y de temporada puede ser en ocasiones perjudicial para el medioambiente?* Las decisiones de consumo de los hogares se

toman principalmente en función de las preferencias, las costumbres, los precios de los bienes y la renta que estos disponen. El eslogan *consume productos locales y de temporada* se ha convertido en un criterio que trata de facilitar la toma de decisiones de los hogares medioambientalmente sostenibles. Sin embargo, cuando analizamos los impactos asociados a esas decisiones consumo pueden surgir diferentes *trade-offs* y sinergias cuando consideramos al mismo tiempo varios tipos de impactos ambientales. En el trabajo de (Tobarra *et al.*, 2018) comprobamos cómo cuando los hogares españoles consumen frutas y verduras producidas por la agricultura nacional dicho eslogan era cierto en términos de huella de carbono para la mayoría de los meses. El consumo local supone un ahorro en términos de huella de carbono para prácticamente todas las frutas y verduras consumidas, estén o no en temporada en la economía española, con relación a las importaciones. Sin embargo, el consumo de frutas y verduras locales que no están en temporada en la economía española supone, en muchos meses del año, una mayor huella de agua respecto al consumo de esos mismos bienes importados. La escasez de agua de la economía española y la abundancia en otras regiones del planeta está detrás de estos resultados. La solución hay que buscarla en mecanismos de transmisión de información a los consumidores sencillos, pero ajustados a la evidencia científica. En este caso, la propuesta sería el diseño por parte de los supermercados y fruterías de un plato de productos de bajo huella de carbono y agua para cada mes, lo que facilitaría la toma de decisiones sostenible por parte de los consumidores y permitiría el consumo de productos locales e importados cuando ambos sean más beneficiosos en términos ambientales.

Otras preguntas centradas en la actuación de los consumidores a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué los hogares rurales disponen de una huella de carbono mayor que los urbanos y, sin embargo, disponen de una menor renta? (Tomás, López y Monsalve, 2020) ¿Por qué el aumento de la desigualdad en la distribución de la renta reduce la huella de carbono de la economía, si los hogares de mayor renta consumen más? (López *et al.*, 2016) ¿Por qué el turismo es una actividad intensiva en emisiones aun siendo fundamentalmente un servicio? (Cadarsó *et al.*, 2015).

### 3.3. Empresas

*¿Por qué las multinacionales que operan en Europa generan más emisiones de carbono que valor añadido?* Las multinacionales que operan fuera de su país de origen tienen numerosos impactos positivos sobre el país al que deslocalizan parte de su producción, al generar empleos, salarios, difundir tecnología, ayudar a crear infraestructuras, etc. Sin embargo, también tienen impactos negativos asociados al uso de recursos y a los desechos que generan. En el artículo de (Ortiz, Cadarso y López, 2020) comprobamos que las filiales de las multinacionales que operan en Europa generaban el 12 % del valor añadido de la Unión Europea, pero, al mismo tiempo, el 17 % de las emisiones de carbono. Esta mayor responsabilidad en términos de emisiones se explica porque dichas multinacionales operan en sectores que directa e indirectamente son más contaminantes que el resto de las empresas de capital nacional del país. Además, la responsabilidad de dichas filiales es mayor cuanto menor es la renta per cápita del país y, por ello, los países más pobres ven comprometidos sus planes de mitigación del cambio climático por la actuación de las multinacionales. Los resultados encontrados nos llevan a recomendar el establecimiento de mecanismos que permiten cuantificar adecuadamente la responsabilidad de las empresas multinacionales, de tal forma que puedan monitorizar sus impactos ambientales y establecer una reducción progresiva de ellos.

Otras preguntas relativas a la actuación de las empresas a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué la transferencia de tecnología entre las multinacionales y sus empresas filiales tendría poco efecto sobre su huella de carbono? (López *et al.*, 2019) ¿Por qué es más contaminante el transporte de los componentes necesarios para fabricar un coche que la propia fabricación del vehículo? (Cadarso *et al.*, 2010) ¿A cuánto asciende la huella de carbono de una empresa? ¿Dónde se genera y en qué proceso puede actuar con mayor intensidad para reducirla? (Álvarez, Tobarra y Zafrilla, 2018).

### 3.4. Países

*¿Por qué el comercio internacional puede reducir las emisiones de carbono si la producción se deslocaliza a países en desarrollo cuya producción es más intensiva en carbono?*

La fragmentación internacional de la producción ha llevado a que las empresas deslocalicen las distintas fases de la producción en aquellos países donde dispongan unos menores costes, principalmente salariales, pero también energéticos. Sin embargo, evaluar si el desplazamiento de la producción hacia países en desarrollo reduce o aumenta la huella de carbono requiere tener en consideración las intensidades de contaminación de todos los países que actúan en la cadena global de la producción. En el trabajo de (López *et al.*, 2018) comprobamos cómo el desplazamiento de la producción a países como China supone un aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> mundial. Sin embargo, el hecho de que China importe recursos naturales de países que son más eficientes en su extracción y tratamiento compensa dichos aumentos. No se puede evaluar adecuadamente el impacto del comercio internacional sobre el medioambiente si no se mapean adecuadamente los impactos a lo largo de la cadena global de la producción. Alcanzar una senda de desarrollo sostenible requiere que los países más contaminantes aborden políticas de sustitución de energías fósiles por energías renovables, pero también que los países consumidores de alta renta se hagan en parte responsables de unos impactos ambientales que se producen a miles de kilómetros de donde son consumidos los bienes y servicios.

Otras preguntas centradas en el papel del comercio internacional de los diferentes países a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿por qué los países más pobres de Europa serían los más afectados por la introducción de un impuesto de carbono? (Ortiz, Cadarso y López, 2020) ¿por qué los países más ricos de la Unión Europea deberían ser solidarios a la hora de financiar las políticas contra la COVID-19 si van a recibir una menor cantidad de fondos? (Monsalve *et al.*, 2018; Monsalve, Zafrilla y Cadarso, 2016)

#### **4. BREVE DESCRIPCIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ENLACES RELEVANTES**

El grupo GEAR de la UCLM (Global Energy and Environmental Economics Analysis Research Group, <https://blog.uclm.es/grupogear/>) está formado por ocho investigadores doctores a tiempo completo y profesores de la Universidad de Castilla-La Mancha, tres becarios de investigación (FPI, FPU y plan propio UCLM) y una investigadora de la Universidad Complutense de Madrid. En los

últimos años, la actividad del grupo ha estado enfocada principalmente al estudio del impacto de la actividad económica y del comercio internacional en la huella de carbono y a evaluar la importancia que los cambios en los patrones de consumo de los hogares tienen sobre la huella de carbono, utilizando como herramienta principal el análisis *input-output*. El grupo GEAR tiene amplia experiencia investigadora, reconocida con doce sexenios de investigación, ha publicado 52 JCR, 33 de ellos situados en revistas del primer cuartil en sus especialidades, desde 2007 hasta la actualidad, y ha colaborado en algunas de sus publicaciones con más de diez investigadores nacionales e internacionales de reconocido prestigio. Ha participado en diversos proyectos entre los que destacan los dos proyectos concedidos por el MINECO en las convocatorias de 2012-2015 y 2016-2019, el proyecto de Red de excelencia de Modelización energética para una transición energética sostenible (Red Mentas link) del que somos coordinadores, el concedido por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID-INTAL) y dos proyectos en convocatorias competitivas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, centrados en la construcción de modelos aplicados al análisis de distintos aspectos de la sostenibilidad. El grupo tiene también experiencia en el desarrollo de convenios de colaboración con instituciones públicas y privadas para evaluar la sostenibilidad en sentido amplio. Los últimos ejemplos en este sentido han sido con la Unión Española Fotovoltaica (UNEF), la Junta de Extremadura, en la elaboración del PEIEC, o una empresa vitivinícola de Castilla-La Mancha.

## REFERENCIAS

ÁLVAREZ, S., TOBARRA, M. A. y ZAFRILLA, J. E. (2018). Corporate and Product Carbon Footprint under Compound Hybrid Analysis: Application to a Spanish Timber Company. *Journal of Industrial Ecology*, 23, pp. 496-507.

CADARSO, M-Á., LÓPEZ, L-A., GÓMEZ, N. y TOBARRA, M-Á. (2010). CO<sub>2</sub> emissions of international freight transport and offshoring: Measurement and allocation. *Ecological Economics*, In Press, Corrected Proof.

— (2012). International trade and shared environmental responsibility by sector. An application to the Spanish economy. *Ecological Economics*, 83, pp. 221-235.

CADARSO, M. A., GÓMEZ, N., LÓPEZ, L. A., TOBARRA, M. A. y ZAFRILLA, J. E. (2015). Quantifying Spanish tourism's carbon footprint: the contributions of residents and visitors. A longitudinal study. *Journal of Sustainable Tourism*, 23, pp. 922-946.

LÓPEZ, L. A., ARCE, G., KRONENBERG, T. y RODRIGUES, J. F. D. (2018). Trade from resource-rich countries avoids the existence of a global pollution haven hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 175, pp. 599-611.

LÓPEZ, L. A., ARCE, G., MORENATE, M. y MONSALVE, F. (2016). Assessing the Inequality of Spanish Households through the Carbon Footprint: The 21<sup>st</sup> Century Great Recession Effect. *Journal of Industrial Ecology*, 20, pp. 571-581.

LÓPEZ, L-A., CADARSO, M-Á., ZAFRILLA, J. y ARCE, G. (2019). The carbon footprint of the U.S. multinationals' foreign affiliates. *Nature Communications*, 10, p. 1672.

MONSALVE, F., ZAFRILLA, J. E. y CADARSO, M. A. (2016). Where have all the funds gone? Multiregional input-output analysis of the European Agricultural Fund for Rural Development. *Ecological Economics*, 129, pp. 62-71.

MONSALVE, F., ZAFRILLA, J., CADARSO, M-Á. y GARCÍA-ALAMINOS, A. (2018). Is the emperor wearing new clothes? A social assessment of the European Union 2007–2013 financial framework. *Economic Systems Research*, 31, pp. 285-304.

ORTIZ, M., CADARSO, M-Á., LÓPEZ, L-A. (2020). The carbon footprint of foreign multinationals within the European Union. *Journal of Industrial Ecology*, n/a.

TOBARRA, M. A., LÓPEZ, L. A., CADARSO, M. A., GÓMEZ, N. y CAZCARRO, I. (2018). Is Seasonal Households' Consumption Good for the Nexus Carbon/Water Footprint? The Spanish Fruits and Vegetables Case. *Environmental Science & Technology*, 52, pp. 12066-12077.

TOMÁS, M., LÓPEZ, L. A. y MONSALVE, F. (2020). Carbon footprint, municipality size and rurality in Spain: Inequality and carbon taxation. *Journal of Cleaner Production*, 266, pp. 121798.

ZAFRILLA, J-E., ARCE, G., CADARSO, M-Á., CÓRCOLES, C., GÓMEZ, N., LÓPEZ, L-A., MONSALVE, F. y TOBARRA, M-Á. (2019). Triple bottom line analysis of the Spanish solar photovoltaic sector: A footprint assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, p. 109311.

ZAFRILLA, J. E., CADARSO, M. A., MONSALVE, F. y DE LA RUA, C. (2014). How Carbon-Friendly Is Nuclear Energy? A Hybrid MRIO-LCA Model of a Spanish Facility. *Environmental Science & Technology*, 48, pp. 14103-14111.

ZAFRILLA, J. E., LÓPEZ, L. A., CADARSO, M. Á. y DEJUÁN, Ó. F.(2012). Fulfilling the Kyoto protocol in Spain: A matter of economic crisis or environmental policies? *Energy Policy*, 51, pp. 708-719.



# Basque Center for Climate Change (BC3). Modelo DENIO: modelo Dinámico Econométrico Neokeynesiano *Input-Output* para España

*Iñaki Arto\**, *Kurt Kratena\*\**, *Xaquín García-Muros\**, *Ignacio Cazcarro\*\*\**  
y *Mikel González-Eguino\**

## 1. OBJETIVO

**D**ENIO es un modelo dinámico econométrico neokeynesiano diseñado para la evaluación del impacto económico de escenarios y políticas en España, en especial aquellas relacionadas con la energía y el cambio climático (despliegue de energías renovables y tecnologías limpias, electrificación, eficiencia energética, rehabilitación, impuestos ambientales, etc.). El modelo analiza el impacto de estas políticas en una serie de variables socioeconómicas como el empleo, producto interior bruto (PIB), balanza comercial, renta/gasto/riqueza de los hogares y su distribución, ahorro cuentas de las administraciones públicas, deuda privada y pública, inflación, etc. (el cuadro 1 recoge un resumen de algunas de las principales variables socioeconómicas calculadas por DENIO).

El modelo está programado en GAMS y se resuelve como un sistema restringido de ecuaciones no lineales. El sistema se resuelve anualmente para la serie temporal comprendida entre el año base y el horizonte temporal de la simulación. DENIO puede utilizarse tanto en solitario como en combinación con modelos energéticos *bottom-up*.

---

\* Low Carbon Group Line, Basque Centre for Climate Change, BC3.

\*\* Centre of Economic Scenario Analysis and Research, CESAR.

\*\*\* Agencia Aragonesa para la Investigación y el Desarrollo, ARAID.

## Cuadro 1

## Cuadro resumen de principales variables socioeconómicas calculadas por DENIO

PIB y precios	Empleo	Cuentas de las AA.PP	Renta, riqueza hogares	Consumo hogares
<i>PIB: demanda</i>	<i>Total empleos</i>	<i>Ingresos AA.PP.</i>	<i>Renta: quintiles</i>	<i>Consumo: quintiles</i>
Consumo hogares	Mujeres	Impto. rentas, patrimonio, etc.	Quintil 1	Quintil 1
Consumo AAPP	Hombres	Impto. producción, productos	Quintil 2	Quintil 2
Formación bruta capital	Agricultura	Contribuciones Seg. Soc.	Quintil 3	Quintil 3
Exportaciones	Minería	Otros ingresos	Quintil 4	Quintil 4
Importaciones	Industria	<i>Gastos AA.PP.</i>	Quintil 5	Quintil 5
Imp. energéticas	Construcción	Transferencias	<i>Renta: componentes</i>	<i>Consumo: categorías</i>
Imp. no energéticas	Energía	Intereses deuda	Salarios	Alimentación
<i>PIB: oferta</i>	Servicios	Formación bruta capital	EBE, renta mixta	Vestido
Agricultura		Consumo	Rentas propiedad	Equipamiento hogar
Minería		Otros gastos	Impto. renta, patrimonio	Salud
Industria		<i>Cap.-nec. financiación</i>	Cotizaciones	Comunicaciones
Construcción		<i>Cap.-nec. financiación/PIB</i>	Prestaciones	Educación
Energía		<i>Deuda pública</i>	Otras transferencias	Hostelería
Servicios		<i>Deuda pública / PIB</i>	<i>Número hogares</i>	Seguros, serv. fin.
Impto. productos			Vulnerables	Otros servicios
<i>PIB: rentas</i>			No vulnerables	Electricidad
Salarios			<i>Ahorro bruto</i>	Calefacción
EBE, renta mixta			<i>Préstamos netos</i>	Carburantes
Impto. producción			<i>Deuda hogares</i>	Transporte
<i>Índice precios consumo</i>			<i>Activos hogares</i>	Electrodomésticos
				Vivienda
				Vehículos

Fuente: Elaboración propia.

## 2. DESCRIPCIÓN

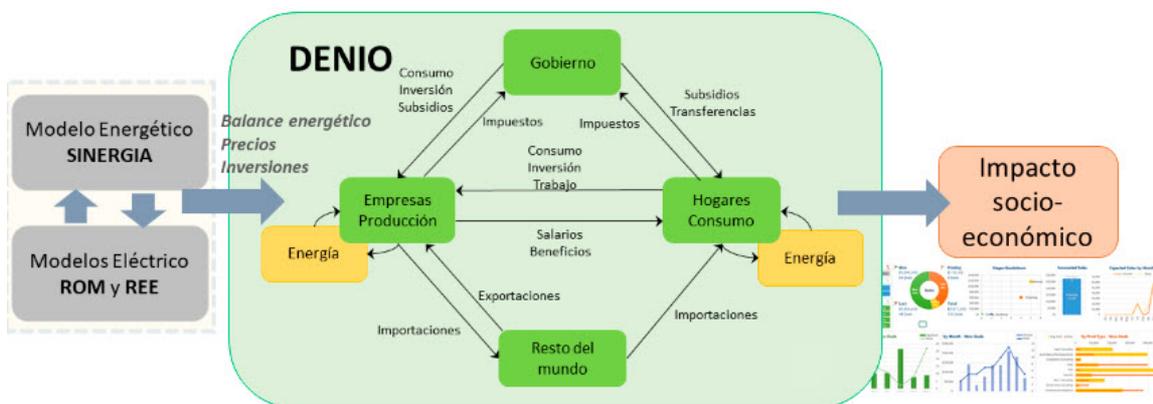
DENIO es un híbrido entre un modelo econométrico *input-output* y un modelo de equilibrio general computable (CGE). El modelo está inspirado en el modelo FIDELIO (*Fully Interregional Dynamic Econometric Long-term Input-Output Model*) de la Comisión Europea (Kratena *et al.*, 2013; Kratena *et al.* 2017). Este modelo ha sido utilizado por la Comisión Europea para la evaluación del impacto económico del *Clean Air Package* (Arto *et al.*, 2015) o el análisis de los efectos políticos proteccionistas en los Estados Unidos (Salotti *et al.*, 2019).

DENIO se caracteriza por la integración de las rigideces y las fricciones institucionales que hacen que en el corto plazo las políticas fiscales y las inversiones tengan un impacto diferente que a largo plazo. En el largo plazo, la economía converge hacia un equilibrio de pleno empleo y en esa fase de equilibrio el modelo funciona de manera similar a un modelo CGE. Sin embargo, a diferencia de un modelo CGE, DENIO describe explícitamente una senda de ajuste hacia este equilibrio. En DENIO actúan dos mecanismos que determinan la característica keynesiana del modelo en el corto plazo y la característica CGE a largo plazo: (i) la heterogeneidad de la propensión marginal al consumo respecto a la renta disponible, según la situación del sector financiero; (ii) el efecto sobre salarios/precios cuando la economía está en o por debajo de la tasa de paro de equilibrio. La propensión marginal al consumo también varía según grupos de renta.

DENIO es un modelo macroeconómico en el cual están representados los principales agentes de la economía en una serie de módulos: empresas/producción, hogares/consumo, mercado laboral, comercio internacional, gobierno, y energía y emisiones (parte central de la figura 1). El modelo incluye un total de 74 sectores (de los cuales 13 son energéticos), 88 productos (25 energéticos), 22.000 tipos de hogares y 16 categorías de consumo. Los parámetros del modelo se han estimado econométricamente utilizando datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística (INE) y del Banco de España (e.g. *Tablas de Origen y Destino del marco Input-Output de la Contabilidad Nacional, Cuentas Anuales no Financieras de los Sectores Institucionales, Encuesta de Población Activa, Encuesta de Presupuestos Familiares, Encuesta de Condiciones de Vida, Estadística Estructural de Empresas del Sector Industrial, Cuentas de los Flujos Físicos de la Energía, las Cuentas Financieras de la Economía Española, Encuesta Financiera de las Familias*, etc.).

Figura 1

## Componentes del modelo DENIO e integración con modelos *bottom-up* del sistema energético



Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento económico en DENIO depende del aumento de la productividad total de los factores a la cual corresponde una senda de precios y, por lo tanto, de competitividad de las exportaciones. Las exportaciones son exógenas y se ajustan en el escenario base a la senda del crecimiento del PIB. Las importaciones son endógenas y no hay ninguna condición de equilibrio sobre el balance exterior.

El módulo de demanda de los hogares comprende tres niveles en los que se determina la demanda que hacen los 22.000 tipos de hogares para un total de dieciséis categorías de gasto. En el primer nivel se deriva la demanda de bienes duraderos (viviendas y vehículos) y la demanda total de no duraderos. El segundo nivel vincula la demanda de energía en unidades monetarias y físicas (Terajulios) con el *stock* de bienes duraderos (casas, vehículos, electrodomésticos), teniendo en cuenta la eficiencia energética del *stock*. En el tercer nivel se determinan nueve categorías de demanda de bienes de consumo no duraderos en un sistema de demanda flexible (*Almost Ideal Demand System*, AIDS). Por último, el gasto total que hacen los hogares de esas dieciséis categorías de consumo (a precios de adquisición) se transforma en un vector de consumo de 88 productos a precios bási-

cos utilizando una matriz-puente producto/gasto y las matrices de valoración proporcionadas por el INE. El modelo está estimado utilizando microdatos de la *Encuesta de Presupuestos Familiares* y de la *Encuesta de Condiciones de Vida*. Los microdatos de ambas encuestas han sido fusionados utilizando un Statistical Matching

El núcleo *Input-Output* del modelo se basa en tablas de Origen y Destino elaboradas por el INE. El modelo de producción vincula las estructuras de producción (tecnologías Leontief) de los 74 sectores y 88 productos a un modelo Translog con cuatro factores de producción (capital, trabajo, energía y resto de *inputs* intermedios). La demanda del factor energía se divide en 25 tipos que a su vez se enlazan con el modelo en unidades físicas (Terajulios y toneladas de CO<sub>2</sub>). El conjunto de categorías de energía del modelo se vincula directamente con dos partes del modelo: i) las cuentas físicas (Terajulios) de energía por industria (74 + hogares) y tipo de energía (25); ii) los productos e industrias de la energía de las tablas de Origen y Destino en unidades monetarias. Para ello se utilizan una serie de precios implícitos que vinculan usos/producción de energía en unidades física (TJ) y en términos monetarios. El módulo energético de DENIO describe, por tanto, la producción y uso de energía de los diferentes agentes de la economía, incluyendo las diferentes ramas de actividad del sector energético, los sectores no energéticos y los hogares.

El elevado nivel de detalle en término de ramas de actividad del sector energético (13) y productos energéticos (25), permite enlazar el modelo DENIO con modelos energéticos *bottom-up*. De esta forma los ejercicios de evaluación se benefician de la mejor representación de las tecnologías relacionadas con las políticas energéticas de los modelos *bottom-up* y de la representación del conjunto de la economía de DENIO. Por ejemplo, en diversos ejercicios de evaluación de políticas, el modelo se ha utilizado en combinación con los modelos energéticos TIMES-SINERGIA, ROM y modelos de Red Eléctrica Española (figura 1). En concreto, DENIO toma de estos modelos datos como el *mix* energético y eléctrico, la intensidad/eficiencia energética, los precios energéticos o las inversiones. Esta información es utilizada por DENIO para analizar los impactos económicos de las diferentes medidas en variables socioeconómicas clave.

La demanda de *inputs* intermedios no-energéticos se modela en tres pasos. En primer lugar, se utiliza un modelo Translog que estima la demanda total de intermedios de cada sector productivo. En segundo lugar, esta demanda se desagrega utilizando las estructuras productivas de la Tabla de Origen del marco *Input-Output*. Por último, la demanda intermedia se divide en productos nacionales e importados. La formación de capital también es endógena y se deriva de la demanda de capital por sector del modelo Translog, aplicando la matriz de formación de capital producto/sector.

El mercado laboral se especifica a través de curvas salariales, donde los aumentos salariales por industria dependen de la productividad, el índice de precios al consumo y la distancia al pleno empleo.

El modelo se cierra mediante la endogeneización de partes del gasto e inversión públicos para cumplir con el programa de estabilidad a medio plazo para las finanzas públicas. Ese mecanismo de cierre de modelo forma parte del módulo del sector público. Ese módulo integra varios componentes de ingresos endógenos: impuestos a la renta (con tipos variables en función de la renta de cada hogar), al patrimonio, al capital, a los productos y a la producción, y cotizaciones a la Seguridad Social. Los pagos de interés por la deuda pública también son endógenos y dependen de la senda de la deuda pública. El consumo público y la inversión son endógenas por el cierre de modelo descrito arriba.

### 3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

DENIO ha sido utilizado para la evaluación del impacto económico de diferentes planes y estrategias diseñadas por el Gobierno de España como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, PNIEC 2021-2030 (González-Eguino *et al.*, 2020; MITECO, 2020a, b), la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, ELP 2050 (MITECO, 2020c) o la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España, ERESEE 2020 (Arto *et al.*, 2019; MITMA, 2020).

En el País Vasco también se ha utilizado un modelo de características similares a DENIO (DERIO: *Dynamic Econometric Regional Input-Output model*) para

analizar el impacto económico de políticas en esta región. En concreto, DERIO se ha utilizado en la evaluación de la Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL GRUPO

El grupo de investigación Low Carbon del Basque Centre for Climate Change (BC3) comenzó su andadura en el año 2013. En la actualidad está compuesto por dieciséis personas de diferentes disciplinas cuya labor investigadora se centra en generar conocimiento que contribuya a la toma de decisiones en el proceso de transición hacia una sociedad baja en carbono. Para ello, el grupo desarrolla herramientas y metodologías para el estudio de las implicaciones sociales, económicas, ambientales y de la transición y el diseño de políticas que faciliten este proceso de una forma justa y equitativa. La actividad del grupo de investigación se caracteriza por su enfoque transdisciplinar, integrador y multiescalar. Desde su creación en 2013 el grupo ha participado en un gran número de proyectos de carácter internacional, incluyendo tres proyectos europeos del 7º Programa Marco (COMPLEX, FLAGSHIP, CECILIA2050), tres proyectos europeos Horizonte 2020 (TRANSrisk, PARIS REINFORE, LOCOMOTION), un proyecto LIFE (URBAN KLIMA 2050) y un proyecto financiado por el International Development Research Centre (DECCMA). También ha trabajado para diversos organismos internacionales (World Bank, World Health Organization, Food and Agriculture Organization, Joint Research Centre) y nacionales (Ministerio para la Transición Ecológica, Ministerio de Fomento, Gobierno Vasco). Asimismo, desde su creación en 2013, el grupo ha publicado más de 80 artículos en revistas científicas, así como numerosos documentos científico-técnicos y ha dirigido cinco tesis doctorales.

#### REFERENCIAS

ARTO, I., GONZÁLEZ-EGUINO, M., RODRÍGUEZ-ZUÑIGA, A. y TOMÁS, M. (2019). Impacto económico de la rehabilitación energética de viviendas en España en el periodo 2021-2030. Estudio (07) para la ERESEE 2020 “Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España”.

Ministerio de Fomento, Subdirección General de Políticas Urbanas, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo.

ARTO, I., KRATENA, K., AMORES, A. F., TEMURSHOEV, U. y STREICHER, G. (2015). *Market-based instruments to reduce air emissions from household heating appliances. Analysis of scrappage policy scenarios*. Luxembourg: European Commission. ISBN 978-92-79-50850-9.

GONZÁLEZ-EGUINO, M., ARTO, I., RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, A., GARCÍA-MUROS, X., SAMPEDRO, J., KRATENA, K., CAZCARRO, I., SORMAN, A. H., PIZARRO-IRÍZAR, C. y SANZ-SÁNCHEZ, M. J. (2020). Análisis de impacto del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 de España. *Papeles de Economía Española*, 163, pp. 9-22.

KRATENA, K., STREICHER, G., SALOTTI, S., SOMMER, M. y VALDERAS JARAMILLO, J. M. (2017). *FIDELIO 2: Overview and theoretical foundations of the second version of the Fully Interregional Dynamic Econometric Long-term Input-Output model for the EU-27*. Luxembourg: European Commission. ISBN 978-92-79-66258-4.

KRATENA, K., STREICHER, G., TEMURSHOEV, U., AMORES, A. F., ARTO, I., MONGELLI, I., NEUWAHL, F., RUEDA-CANTUCHE, J. M. y ANDREONI, V. (2013). *FIDELIO 1: Fully Interregional Dynamic Econometric Long-term Input-Output Model for the EU27*. Luxembourg: European Commission. ISBN 978-92-79-30009-7.

MITECO, MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (2020a). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, PNIEC 2021-2030*.

— (2020b). *Impacto económico, de empleo, social y sobre la salud pública del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*.

— (2020c). *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, 2050. Estrategia a largo plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050*.

MITMA, MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA. (2020). ERESEE 02020, Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España.

SALOTTI, S., ROCCHI, P., RUEDA-CANTUCHE, J. M. y ARTO, I. (2019). *Macroeconomic effects of US tariffs on steel and aluminium: who would pay the bill?* Luxembourg: European Commission. ISBN 978-92-76-08299-6.



# Institute for Advanced Research in Business and Economics (INARBE), Universidad Pública de Navarra (UPNA). Modelos de estimación de eficiencia y modelos de equilibrio general aplicado

*Pablo Arocena y Antonio G. Gómez-Plana\**

**E**l Institute for Advanced Research in Business and Economics (INARBE) es un centro de investigación de la Universidad Pública de Navarra que aglutina a más de cincuenta investigadores en el ámbito del análisis económico de organizaciones, mercados y políticas públicas. Además del desarrollo de la investigación académica, tanto teórica como aplicada, INARBE pretende ser un instrumento para impulsar la transferencia de conocimiento a los agentes económicos y sociales de nuestro entorno.

En materia de modelización energética, llevamos a cabo dos líneas de trabajo centradas en el análisis de la eficiencia energética. La primera tiene como objetivo el desarrollo de marcos y modelos para la estimación de las ganancias potenciales de eficiencia en el uso de la energía que pueden alcanzarse en los distintos sectores económicos. La segunda tiene como objetivo la evaluación de las consecuencias económicas y medioambientales de la mejora en la eficiencia en la utilización de la energía como factor de producción a través de modelos de equilibrio general aplicado. Ambas líneas se están desarrollando en la actualidad en el marco del proyecto “Efficiency, innovation, competitiveness and sustainable Performance” del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad Ministerio de Economía y Competitividad (ECO2017-86054-C3-2-R, AEI/FEDER,EU).

---

\* Institute for Advanced Research in Business and Economics (INARBE).

## 1. LA ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El uso eficiente de la energía y la promoción del ahorro energético ocupa un lugar destacado en la agenda económica y medioambiental de muchos países. Así, la mejora de la eficiencia energética constituye uno de los pilares del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, PNIEC. La eficiencia energética de una economía generalmente se representa mediante la tasa de la intensidad energética agregada, calculada como la relación entre la energía consumida y el PIB. No obstante, no existe una medida única y generalmente aceptada de eficiencia energética. Básicamente, la medición de la eficiencia se fundamenta en la idea de comparar el desempeño real de una unidad económica con el desempeño óptimo que permite la tecnología. Sin embargo, este límite tecnológico no es directamente observable, por lo que debe estimarse empíricamente a partir de los datos.

Los modelos de análisis frontera para el análisis de la eficiencia y productividad son metodologías que permiten la estimación de distintas dimensiones relacionadas con la eficiencia productiva (y en general con diversas medidas de desempeño o *performance*), así como la identificación de sus fuentes y determinantes. Estas metodologías se agrupan fundamentalmente en dos familias genéricas: el análisis de fronteras estocásticas (basado en modelos econométricos) y el *Data Envelopment Analysis* (basado en modelos de programación lineal). Independientemente del tipo de enfoque metodológico adoptado, el objetivo es la estimación de una frontera de producción (o de costes) a partir de las mejores prácticas observadas. Esa frontera sirve como referencia para el resto de unidades que se analizan, de tal forma que la medida de la *performance* de una unidad (una empresa, una región, un país) viene definida por su distancia a esa frontera. En nuestro trabajo, aplicamos estas metodologías para la estimación de la (in)eficiencia energética y medioambiental, permitiendo cuantificar las posibilidades de mejora en la utilización de los recursos, la reducción del consumo energético y emisiones.

En Arocena, Gómez Gómez-Plana y Peña (2016a) analizamos el cambio de intensidad energética combinando el enfoque clásico de descomposición de números índice (en concreto el *Logarithmic Mean Divisia Index*) con métodos frontera de eficiencia. Aplicamos este marco para descomponer y analizar las fuentes del

cambio observado en la intensidad energética de las industrias manufactureras españolas durante el período 1999-2007 a partir de datos regionales. El análisis permite entre otras cosas, identificar un potencial importante para reducir el consumo de energía en la industria manteniendo el nivel de producción observado en cada uno de los sectores, tanto a través de la eliminación de la ineficiencia técnica en el uso de la energía como mediante cambios en la combinación del resto de factores.

## 2. LOS EFECTOS DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA: SIMULACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE MODELOS DE EQUILIBRIO GENERAL APLICADO

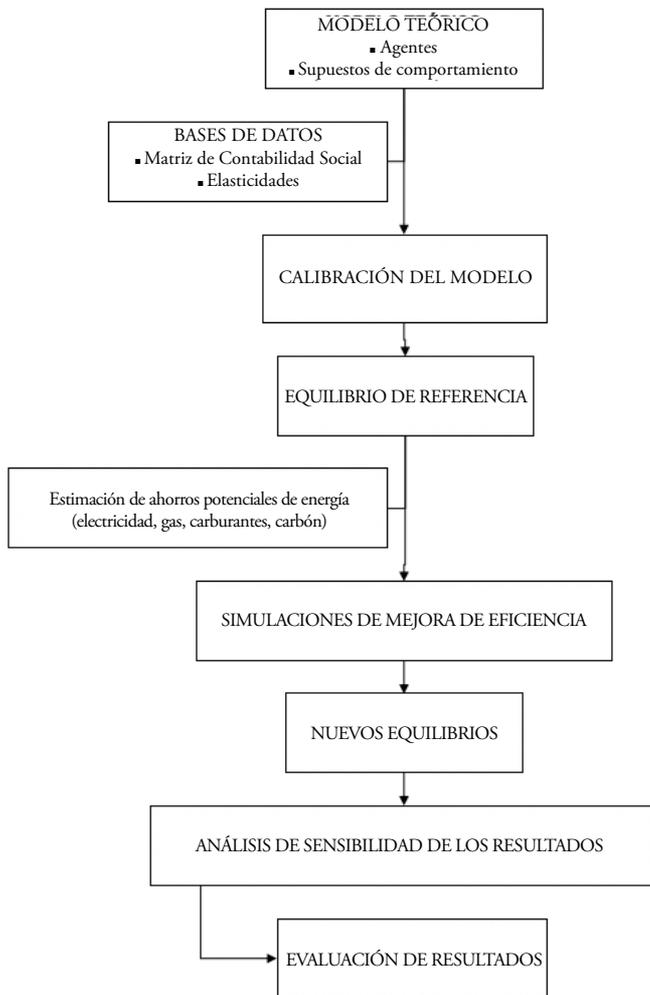
Los modelos de equilibrio general computacional o aplicado (MEGA o *CGE models*, en terminología inglesa) forman parte del conjunto de modelos *top-down* capaces de evaluar endógenamente las interacciones entre los distintos mercados de bienes y factores que existen en una economía. La figura 1 muestra el método de análisis con un modelo de equilibrio general aplicado.

Se parte de un modelo teórico que intenta ser una representación simplificada de la economía de un país. A través de ecuaciones en el modelo se muestran los comportamientos de los agentes, tales como consumidores y productores, además de poder incluir también el sector público y el sector exterior (véase figura 2). Este sistema de ecuaciones viene determinado por supuestos como los comportamientos optimizadores de ciertos agentes, el establecimiento de reglas de fijación de precios por parte de los productores, la consideración de determinadas formas funcionales para las ecuaciones del modelo o el carácter exógeno, endógeno o calibrado de las variables representadas, entre otros.

Estos modelos parten de la extensión de las tablas *input-output* a matrices de contabilidad social (SAM) como una de sus bases de datos fundamentales. Permiten la simulación de cambios puntuales en las decisiones de política económica, de uso de la tecnología y de comportamiento de la demanda, así como representar en detalle la relación entre las tecnologías utilizadas y las fuentes energéticas requeridas, o la cuantificación del volumen de emisiones contaminantes o de gases de efecto invernadero. Por ello, su papel como modelos de simulación está ampliamente reconocido en el ámbito energético y medioambiental.

Figura 1

## Método de análisis con un modelo de equilibrio general aplicado

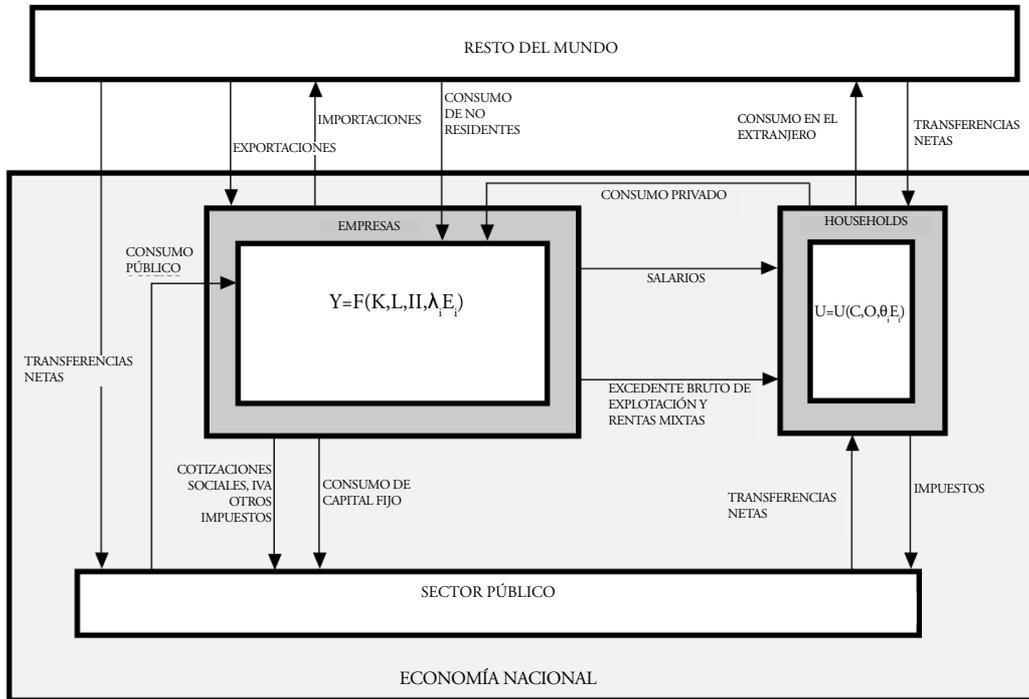


Fuente: Elaboración propia.

Los modelos parten de una concepción de equilibrio walrasiano, bajo una serie de supuestos estructurales. Estos supuestos consisten en la definición de un comportamiento de los productores y de unas preferencias de los consumidores, que pueden tener un alto nivel de desagregación sectorial. Presentan, por tanto, una aproximación que permite detectar cómo un cambio en un sector o en un agente concreto de un país, u otra área geográfica, puede afectar al conjunto de la economía representada. Los modelos evalúan endógenamente los cambios en precios y cantidades, y están sujetos a restricciones de carácter tecnológico y de dotación de factores de la economía.

Figura 2

## Representación simplificada de una economía



Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, hemos desarrollado un primer modelo de equilibrio general aplicado para analizar el impacto que tendría una mejora de la eficiencia en el uso de la energía en la economía española. El modelo es un MEGA estático que describe una economía abierta, desagregada en 27 sectores productivos, con 27 bienes de consumo, un consumidor representativo, un sector público, y el resto del mundo. El modelo permite simular el impacto que tendría una mejora de la eficiencia en el uso de la energía como *input* intermedio y como consumo final, recogido en las funciones de producción de las empresas y en las funciones de utilidad de los hogares representadas en la figura 2. Por un lado, el análisis tiene como principal objetivo predecir la magnitud de los potenciales efectos rebote, es decir, la posibilidad de que la mejora de la eficiencia energética pueda llevar a reducciones (o incluso aumentos) del consumo de energía menores de lo esperado. Además, permite identificar en qué sectores y en qué tipos de energía

este efecto puede ser más intenso. Por otra parte, posibilita anticipar las consecuencias que podrían derivarse de una mejora de la eficiencia energética en las variables a nivel macroeconómico: variaciones en el empleo, las rentas de los factores y el PIB. Arocena, Gómez-Plana y Peña (2016b) presentan una breve descripción del modelo y sus principales resultados.

En la actualidad se está trabajando en diversas extensiones de este modelo básico. Asimismo, se pretenden estimar las mejoras potenciales de eficiencia de forma individual para distintas energías en industrias concretas de la economía española, con el fin de simular sus efectos a través del MEGA, tal y como se recoge en la figura 1.

## REFERENCIAS

AROCENA, P., GÓMEZ GÓMEZ-PLANA, A. y PEÑA, S. (2016a). A Decomposition of the Energy Intensity Change in Spanish Manufacturing. En: J. APARICIO, C. A. K. LOVELL y J. T. PASTOR (Eds.), *Advances in Efficiency and Productivity*, pp. 365-390. Springer.

— (2016b). La eficiencia energética, el efecto rebote y el crecimiento económico. *Papeles de Energía*, 2, pp. 39-63. Madrid: Funcas.

# Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDs), Universidad de Valladolid. Modelo MEDEAS

*Iñigo Capellán-Pérez, Ignacio de Blas, Jaime Nieto, Margarita Mediavilla, Carlos de Castro, Óscar Carpintero, Luis Fernando Lobejón, David Álvarez-Antelo, Noelia Ferreras-Alonso, Gonzalo Parrado, Fernando Frechoso, Carmen Duce-Díaz y Luis Javier Miguel\**

## 1. OBJETIVO DE LA HERRAMIENTA Y APLICACIONES PREFERENTES

Los modelos MEDEAS son un conjunto de modelos dinámicos y recursivos de simulación que han sido diseñado por el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid (GEEDS-UVa). Se han desarrollado dentro del proyecto europeo de mismo nombre “MEDEAS (*Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints*)” que tenía como meta proporcionar a los encargados de formular políticas nuevos instrumentos de modelización para evaluar mejor los impactos y limitaciones de la transición del sistema energético de la Unión Europea a uno más sostenible. El objetivo de los modelos MEDEAS es entonces facilitar la evaluación de políticas que estudian cómo realizar la transición energética durante las próximas décadas. En los modelos MEDEAS se pueden analizar, entre otras, políticas de decarbonización del transporte (de Blas *et al.*, 2020), de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Nieto *et al.*, 2020) o de modificación de la demanda de los hogares.

Otro objetivo de los modelos MEDEAS es facilitar a los ciudadanos la comprensión del problema de la sostenibilidad global, con el doble propósito de concienciarlos sobre la gravedad del problema y ayudarlos a comprender mejor la complejidad de las soluciones. Para ello basado en los modelos MEDEAS se han

\* Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid. GEEDS-UVa.

diseñado distintas herramientas como por ejemplo un juego de simulación participativa (Capellán-Pérez, Álvarez-Antelo y Miguel González, 2019).

## 2. DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN CUALITATIVA, FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESQUEMÁTICA, TIPOS DE DATOS NECESARIOS, Y ENLACES A LA DOCUMENTACIÓN RELEVANTE

Los modelos MEDEAS son un conjunto de modelos agregados de economía, energía y medio ambiente (o modelos de evaluación integrada, IAM). Han sido diseñados utilizando la dinámica de sistemas, la cual facilita la integración del conocimiento desde diferentes perspectivas. La dinámica de sistemas es una metodología utilizada para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos debido a su capacidad para representar explícita y dinámicamente realimentaciones, retrasos existentes en el sistema y no linealidades.

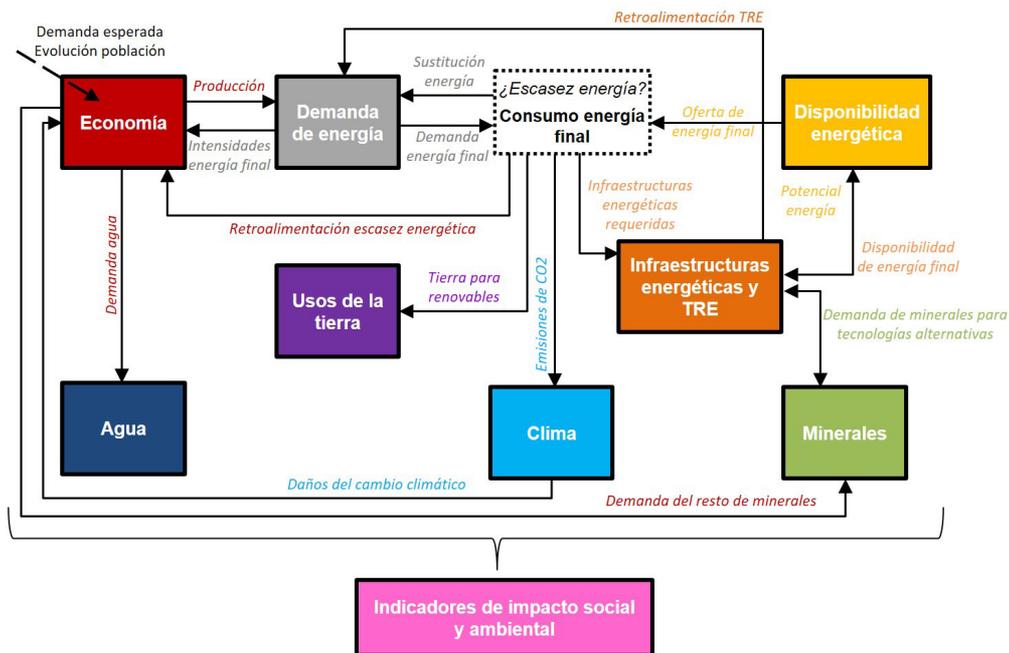
El conjunto de modelos de simulación MEDEAS está compuesto por modelos en tres diferentes escalas geográficas: global (MEDEAS-W), Unión Europea (MEDEAS-EU) y país (MEDEAS-AUT y MEDEAS-BGR). Por simplicidad, la integración entre modelos es secuencial (una sola dirección): los modelos “padre” (W, EU) proporcionan entradas a los modelos “hijo” (EU, país).

Todos los modelos tienen una estructura modular y flexible en la que cada módulo se puede modificar. Los modelos están estructurados en nueve módulos principales: economía, demanda de energía, disponibilidad de energía, infraestructuras energéticas y tasa de retorno energético, minerales, uso de la tierra, agua, clima y emisiones e indicadores de impactos sociales y medioambientales. La figura 1 muestra el esquema conceptual del modelo MEDEAS-W incluyendo las principales relaciones entre los módulos. Las principales características de cada módulo son:

- *Economía*: está modelada siguiendo un enfoque poskeynesiano de desequilibrio (los mercados no están obligados a vaciarse, como es habitual en economía convencional) y donde el crecimiento económico depende del nivel de demanda de los 35 sectores económicos considerados y los hogares. La estructura económica está representada a través de tablas *input-output* (TIO).

Figura 1

## Esquema general de los módulos de MEDEAS-W y sus relaciones



Fuente: Capellán-Pérez *et al.* (2020).

- **Demanda de energía:** la demanda final de energía, por sector y de los hogares, se estima a través de las proyecciones de manera sectorial de la producción económica y de las intensidades energéticas finales. La evolución de las intensidades energéticas finales tiene en cuenta las mejoras de eficiencia y la sustitución energética generada tanto por políticas como por la escasez de recursos.
- **Disponibilidad energética:** en este módulo se estima la disponibilidad de recursos de las energías renovables y no renovables teniendo en cuenta las limitaciones biofísicas y temporales. En total, se tienen en cuenta 25 fuentes y tecnologías primarias de energía y cinco energías finales (electricidad, calor, sólidos, gases y líquidos). La intermitencia de las energías renovables en el modelo se computa endógenamente a través de las sobrecapacidades y el almacenamiento de energía, dependiendo de la penetración de las tecnologías energéticas variables.
- **Infraestructuras de energía y tasa de retorno energético (TRE):** este módulo estima las capacidades para generar electricidad y calor teniendo en cuenta los tiempos

de planificación y construcción. Las inversiones en energía para que las energías renovables generen electricidad se modelan de forma endógena y dinámica, de modo que se puede estimar la TRE de las tecnologías individuales y de todo el sistema energético. La demanda de energía varía en función del TRE del sistema. El transporte se modela detalladamente diferenciando entre clases de vehículos para los hogares y para transporte terrestre de mercancías y de pasajeros.

- **Minerales:** se estiman los recursos necesarios para toda la economía, especialmente los utilizados para la construcción, operación y mantenimiento de tecnologías alternativas de energía. También se consideran las políticas de reciclaje.
- **Uso de la tierra:** este módulo estima fundamentalmente los requerimientos de tierra adicionales debido al uso de las energías renovables.
- **Agua:** este módulo proyecta el uso del agua por tipo (azul, verde y gris) y por sector económico y para uso en los hogares.
- **Clima:** el modelo global estima los efectos de cambio climático a partir de las emisiones de GEI emitidas por la sociedad. Este módulo incluye una función de daño que transforma los efectos de cambio climático en daños al sistema económico.
- **Indicadores de impacto social y ambiental:** en este módulo los resultados “biofísicos” se trasladan en impactos sociales y ambientales. Su objetivo es explorar las repercusiones para la sociedad humana en términos de bienestar e impactos ambientales.

Una descripción más completa de los módulos de MEDEAS y los resultados obtenidos en el modelo se puede encontrar en el artículo “MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints” de la revista *Energy & Environmental Science* (Capellán-Pérez *et al.*, 2020). Documentación más detallada de los modelos con los datos y ecuaciones utilizadas en ellos se puede obtener en la web del proyecto MEDEAS ([www.medeas.eu/](http://www.medeas.eu/)). Los modelos han sido desarrollados con el *software* Vensim DSS y trasladados a Python. Los modelos están disponibles para cualquier usuario de manera gra-

tuita en <https://www.medeas.eu/model/medeas-model> y futuras actualizaciones se encontrarán en la página web del grupo [www.geeds.es](http://www.geeds.es).

### 3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como se ha dicho en el apartado anterior, el objetivo de los modelos MEDEAS es facilitar el análisis de las políticas que buscan la transición a un sistema energético más sostenible. Un buen ejemplo son las políticas de descarbonización de sector transporte (de Blas *et al.*, 2020). El transporte es normalmente identificado como uno de los sectores más difíciles de descarbonizar. Esto es debido a las actuales pautas de movilidad cultural, al continuo crecimiento de la demanda mundial de movilidad y las limitaciones técnicas existentes para sustituir los combustibles derivados del petróleo. Actualmente el transporte depende en gran medida de los combustibles líquidos (95 %) y más del 50 % del total de los combustibles líquidos se dedican a este fin.

El modelo MEDEAS-W se ha utilizado para estudiar cuatro estrategias distintas de descarbonización del sector transporte en 2050. Los resultados muestran que una sustitución masiva de los vehículos de petróleo por vehículos eléctricos no consigue reducir por sí sola las emisiones de GEI y además podría dar lugar a la escasez de algunos minerales clave, como el litio o el magnesio. Según los resultados obtenidos, la única estrategia de las cuatro analizadas que puede lograr los objetivos de reducción de emisiones a nivel mundial es el decrecimiento, que combina un cambio rápido y radical a vehículos eléctricos más ligeros y modos de transporte no motorizados junto con una drástica reducción de la demanda total de transporte.

El otro gran objetivo de los modelos MEDEAS es facilitar a los ciudadanos una comprensión del problema de la sostenibilidad global. Para ello se ha desarrollado, utilizando MEDEAS-W, un juego de simulación participativa para que cualquier persona pueda testear políticas de reducción de emisiones de GEI a nivel global y ver sus efectos económicos y ambientales. El juego llamado *Global Sustainability Crossroads* se basa en un interfaz que permite realizar simulaciones con el modelo. El interfaz del juego está disponible para todos a quienes les interese (tanto en versión en inglés como en castellano) en la página web del grupo

([www.geeds.es/global-sustainability-crossroads](http://www.geeds.es/global-sustainability-crossroads)) y la descripción del juego y las experiencias pedagógicas llevadas a cabo hasta diciembre de 2018 se han publicado en la revista *Sustainability* (Capellán-Pérez, Álvarez-Antelo y Miguel, 2019).

MEDEAS se ha utilizado también para otros estudios científicos, por ejemplo, el análisis de los objetivos del “Energy Roadmap 2050”, empleando el modelo MEDEAS-EU (Nieto *et al.*, 2020), o el estudio de la tasa de retorno energético (TRE) dinámica y los requerimientos de materiales en la transición global a las energías renovables (Capellán-Pérez, de Castro y Miguel González, 2019).

#### 4. BREVE DESCRIPCIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ENLACES RELEVANTES

El grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid lo formamos un grupo de profesores e investigadores de diversas áreas de conocimiento, tales como Economía Aplicada, Física, Ingeniería Eléctrica, Sociología o Ingeniería de Sistemas y Automática. Todos nosotros compartimos una preocupación personal y profesional por el desarrollo humano sostenible, que ha conducido una parte importante de nuestra trayectoria académica y compromiso social. (<https://geeds.es/>). De esta forma hemos intentado acercar nuestras preocupaciones como ciudadanos del mundo a la investigación académica en la universidad.

Nuestras líneas de investigación se centran en la energía y la economía, como factores clave de la tecnología y la vida; y en la dinámica de sistemas, como la herramienta más adecuada para analizar las complejas relaciones entre algunas de las variables que influyen en la sostenibilidad y el desarrollo, con una visión sistémica. Participamos en distintos proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales, entre ellos el mencionado MEDEAS ([www.medeas.eu/](http://www.medeas.eu/)), recientemente finalizado, LOCOMOTION ([www.locomotion-h2020.eu](http://www.locomotion-h2020.eu)) o MODESLOW.

## REFERENCIAS

CAPELLÁN-PÉREZ, I., ÁLVAREZ-ANTELO, D. y MIGUEL, L. J. (2019). Global Sustainability Crossroads: A Participatory Simulation Game to Educate in the Energy and Sustainability Challenges of the 21st Century. *Sustainability*, 11 3672. <https://doi.org/10.3390/su11133672>

CAPELLÁN-PÉREZ, I., DE BLAS, I., NIETO, J., DE CASTRO, C., MIGUEL, L. J., CARPINTERO, Ó., MEDIAVILLA, M., LOBEJÓN, L. F., FERRERAS-ALONSO, N., RODRIGO, P., FRECHOSO, F. y ÁLVAREZ-ANTELO, D. (2020). MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy Environ. Sci.* <https://doi.org/10.1039/C9EE02627D>

CAPELLÁN-PÉREZ, I., DE CASTRO, C. y MIGUEL GONZÁLEZ, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>

DE BLAS, I., MEDIAVILLA, M., CAPELLÁN-PÉREZ, I. y DUCE, C. (2020). The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>

NIETO, J., CARPINTERO, Ó., LOBEJÓN, L. F. y MIGUEL, L. J. (2020). An ecological macroeconomics model: The energy transition in the EU. *Energy Policy*, 145 , 111726. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111726>



# Unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía. Modelo PICASO

*Zaira Navas-Anguita y Diego Iribarren\**

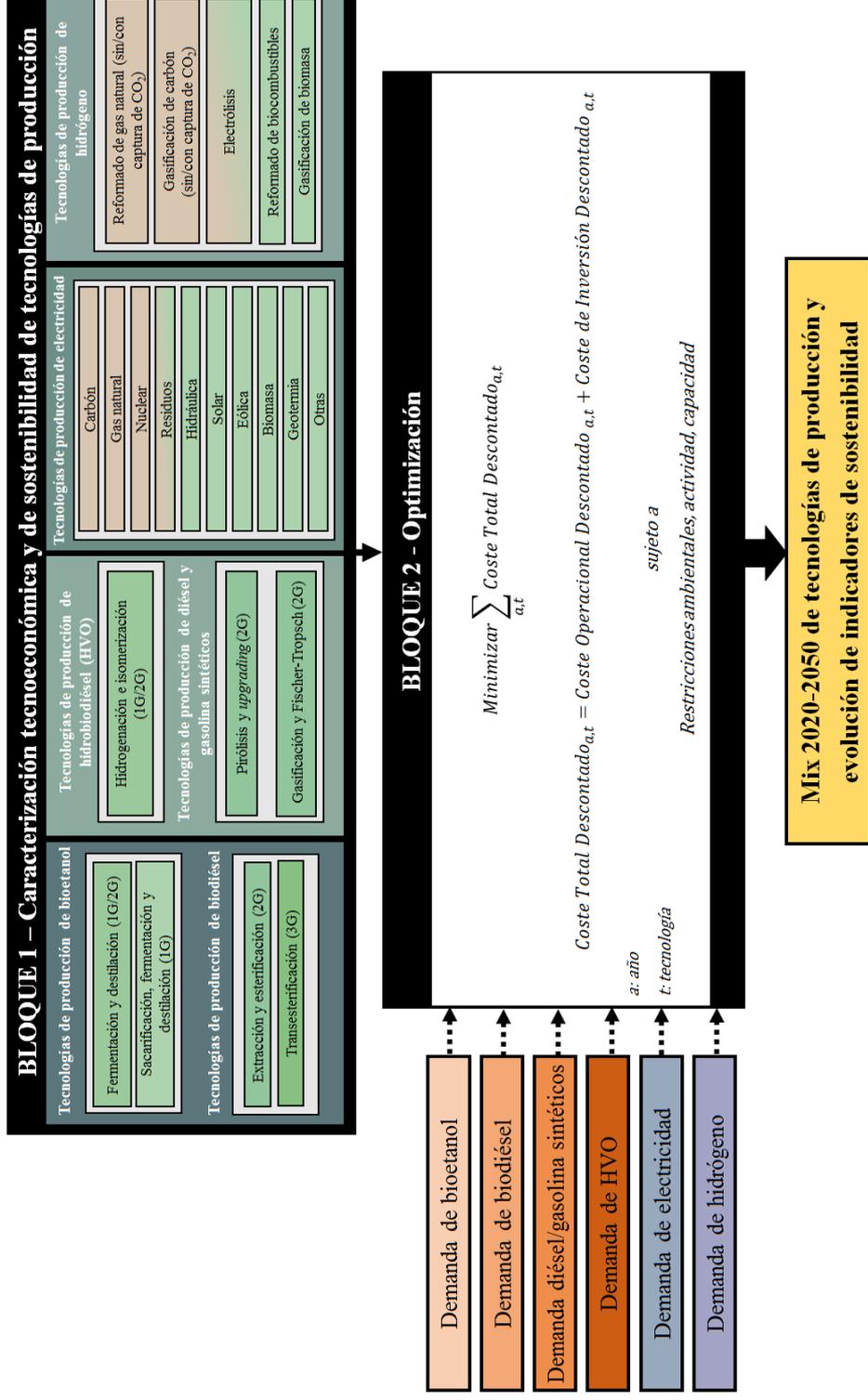
En el marco del proyecto “Planificación de la Implementación de Combustibles Alternativos en el sector energético español para un transporte Sostenible” (ENE2015-74607-JIN AEI/FEDER/UE), la Unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía ha desarrollado el modelo energético PICASO. Se trata de un modelo energético nacional de optimización concebido para el análisis prospectivo de *mixes* de tecnología de producción de combustibles alternativos para el transporte por carretera, con horizonte temporal 2050. Estos combustibles alternativos incluyen varios tipos de biocombustibles, electricidad e hidrógeno. El objetivo final es aportar información robusta en el ámbito de la energía y el transporte que sea de relevancia para los principales agentes de toma de decisión tanto a nivel político como empresarial, facilitando una orientación real al objetivo global de la sostenibilidad.

La figura 1 representa, de una manera simplificada, el modelo de optimización desarrollado para el análisis prospectivo del *mix* nacional de tecnologías de producción de combustibles alternativos, con un marco temporal 2020-2050. En comparación con otros modelos en este campo, el modelo PICASO presenta dos innovaciones destacadas: (i) un gran desglose de tecnologías de producción para las opciones donde cabe esperar competencia tecnológica –como es el caso de los distintos tipos de biocombustibles, electricidad e hidrógeno (bloque 1 de la figura 1)– y (ii) la integración de indicadores de sostenibilidad del ciclo de vida para cada opción. La implementación de indicadores de sostenibilidad (por ejemplo, la huella de carbono) directamente en el modelo PICASO posibilita la inclusión de condicionantes adicionales en el problema de optimización, de forma que la optimización no tenga un carácter meramente tecnoeconómico. A este respecto, cada tecnología de producción se define gracias a su caracterización

---

\* Unidad de Análisis de Sistemas, IMDEA Energía.

Figura 1  
 Representación del modelo energético PICASO para el análisis prospectivo del *mix* nacional de tecnologías de producción de combustibles alternativos



Fuente: Elaboración propia.

tecnoeconómica y de sostenibilidad, teniendo en cuenta la evolución esperada de aspectos como los costes de inversión y la eficiencia. Esta caracterización de las tecnologías en el modelo permite la posterior optimización del *mix* de tecnologías de producción que satisfaga una demanda exógena dada (bloque 2 de la figura 1).

El modelo PICASO y su aplicación se encuentran detallados en el trabajo de Navas-Anguita, García-Gusano e Iribarren (2020), recientemente publicado en la revista científica *Energy Conversion and Management*. En este trabajo se generaron resultados para los tres combustibles alternativos anteriormente mencionados, llegando así a una discusión de los *mixes* de tecnologías de producción que podrían satisfacer la demanda de los distintos biocombustibles considerados (incluyendo bioetanol, biodiésel, diésel y gasolina sintéticos e hidrobiodiésel o HVO), la electricidad demandada por los vehículos eléctricos y el hidrógeno demandado por los vehículos de pila de combustible. Se consideraron escenarios con una penetración media de vehículos y combustibles alternativos según se detalla en Navas-Anguita, García-Gusano e Iribarren (2020). Tras la optimización para el marco temporal 2020-2050, se llegó a la conclusión de que los combustibles alternativos se producirían fundamentalmente mediante tecnologías basadas en energías renovables:

- El bioetanol (utilizado para mezcla en la gasolina fósil) y el biodiésel (utilizado para mezcla en el diésel fósil) se producirían por fermentación y esterificación de biomasa de segunda generación, respectivamente. En cuanto a los biocombustibles sintéticos, estos se producirían mediante pirólisis de biomasa de segunda generación en el corto-medio plazo y mediante gasificación de biomasa de segunda generación en el largo plazo. La producción de HVO estaría basada en la hidrogenación de biomasa de segunda generación.
- La electricidad asociada a la penetración de vehículos eléctricos se produciría mediante tecnologías basadas en fuentes renovables como plantas eólicas y solares.
- El hidrógeno limpio destinado al transporte por carretera se produciría por electrólisis, potencialmente sin la contribución de otras tecnologías como el reformado de gas natural con captura de CO<sub>2</sub>.

Todo ello, junto con la estructura y caracterización desarrollada en el modelo PICASO, se espera que sea de relevancia no solamente para investigadores y analistas sino también para un amplio abanico de agentes de toma de decisión, apoyándolos de manera efectiva en el camino hacia el objetivo global de implantar sistemas energéticos sostenibles.

Este trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación en planificación energética y análisis prospectivo de sistemas energéticos de la Unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía (<https://www.energia.imdea.org/>). Esta Unidad se encarga de la evaluación de sistemas energéticos tanto convencionales como alternativos desde una perspectiva técnica, económica, ambiental y social. Sus objetivos incluyen el análisis de sostenibilidad del ciclo de vida de sistemas energéticos, la simulación, optimización y diseño funcional de procesos energéticos, y la modelización y planificación energética. En el modelo PICASO, estos objetivos y las capacidades de la Unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía se traducen en un marcado carácter prospectivo y de sostenibilidad al servicio de los agentes de toma de decisión en el ámbito de la energía y el transporte.

## REFERENCIA

NAVAS-ANGUITA, Z., GARCÍA-GUSANO, D. e IRIBARREN, D. (2020). Long-term production technology mix of alternative fuels for road transport: A focus on Spain. *Energy Conversion and Management*, 226 (2020) 113498. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113498>

# Unidad de Análisis de Sistemas de CIEMAT. Marco FISA y modelo TIMES-Spain

*Yolanda Lechón y Santacruz Banacloche\**

## 1. OBJETIVO DE LA HERRAMIENTA Y APLICACIONES PREFERENTES

El marco para el análisis integrado de la sostenibilidad denominado FISA, por sus siglas en inglés *Framework for Integrated Sustainability Assessment*, tiene por objetivo analizar la sostenibilidad, principalmente en el campo de las inversiones en energías renovables, teniendo en cuenta los impactos ambientales, socioeconómicos y sociales de la producción de bienes y servicios a lo largo de su cadena de valor.

## 2. DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN CUALITATIVA, FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESQUEMÁTICA, TIPOS DE DATOS NECESARIOS, Y ENLACES A LA DOCUMENTACIÓN RELEVANTE

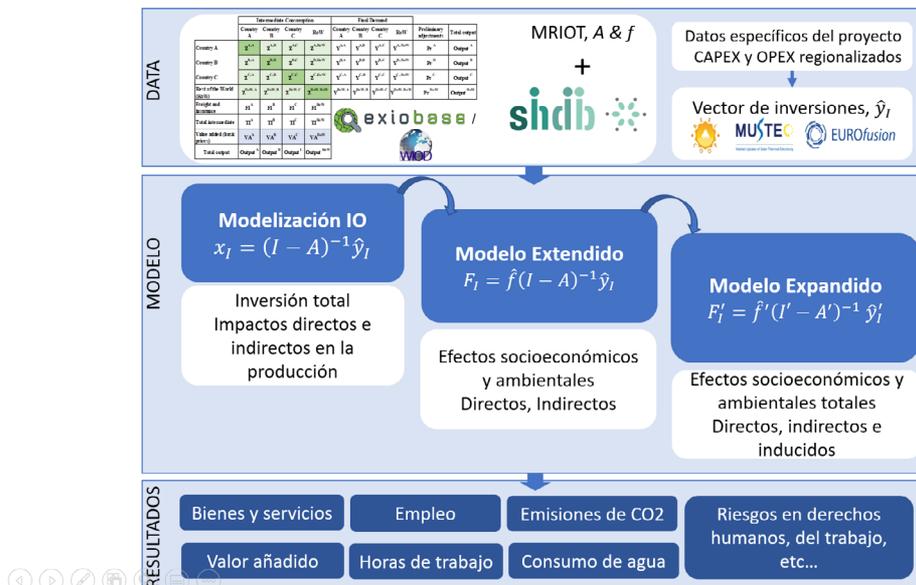
Gracias al enfoque multirregional de la metodología *Input-Output* (*Multiregional Input-Output* “*MRIO*”), se miden los efectos totales (directos, indirectos e inducidos) de cualquier producto o servicio a lo largo de su cadena de suministro, derivados de un aumento en la demanda de bienes y servicios en los diferentes sectores económicos y países involucrados en la cadena de valor. En segundo lugar, la dimensión social se integra en FISA con información de riesgos sociales incluidos en la base de datos SHDB (por sus siglas en inglés, *Social Hotspot Database*). Esta combinación tiene como resultado la creación del “Índice Social del Proyecto” o PSI (por sus siglas en inglés, *Project Social Index*), que permite identificar los puntos sociales críticos del proyecto, o también llamados PSH (por

---

\* Unidad de Análisis de Sistemas, CIEMAT.

Figura 1

## Representación del modelo FISA para el análisis de sostenibilidad de inversiones



sus siglas en inglés, *Project Social Hotspots*). Los PSH corresponden a aquellos sectores económicos que resultan más estimulados por el proyecto (en términos de horas de trabajo) pero también los que albergan altos riesgos sociales (Rodríguez-Serrano, 2017).

Para adaptar el modelo *Input-Output* a las inversiones en energía, una vez elegida la tabla MRIO, el próximo paso es crear vectores de inversión. Junto con las dos herramientas previamente expuestas, el marco FISA requiere de datos específicos del proyecto de inversión (para las fases de inversión y operación y mantenimiento). La figura 1 explica la adaptación del modelo a inversiones en energía ( $y_I$ ), donde modelamos una demanda final de bienes y servicios necesarios para la instalación y operación y mantenimiento de inversiones en energía. Para ello, necesitamos los siguientes datos:

- Localización de la inversión: país/región anfitriona.

- Lista detallada de costes asociados a los bienes y servicios necesarios para el despliegue de la tecnología en las fases de inversión y operación y mantenimiento.
- País de origen de los componentes, bienes y servicios.
- Aspectos tecnoeconómicos (vida útil de los componentes, tasa de descuento, tipo de cambio, tasa de inflación).

FISA puede ser aplicado a casos de estudio específicos que parten de datos del proceso; así como también a escala nacional para inversiones con un impacto macroeconómico. Toda esta información es necesaria para adaptar los datos específicos de costes a la tabla MRIO. El siguiente paso es asignar los valores relativos a los costes de inversión en un sector y país de origen de la tabla MRIO. Finalmente, combinando los datos procedentes de las MRIOT y de los costes específicos, se obtienen los indicadores de sostenibilidad.

### 3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Este marco se ha utilizado principalmente en el campo de las inversiones en energía relacionados con la termosolar (Banacloche *et al.*, 2020b; Herrera *et al.*, 2020; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2017). Otros ejemplos que beben del marco FISA son los estudios realizados por la Unidad en proyectos como EUROFusion (Banacloche *et al.*, 2020a), o BIOSOL (Banacloche, Herrera y Lechón, 2020c).

## 4. MODELO TIMES-SPAIN

### 4.1. Objetivo de la herramienta y aplicaciones preferentes

El modelo energético TIMES-Spain es un modelo de optimización energética de la familia TIMES. El generador de modelos energéticos TIMES ha sido desarrollado dentro del Programa de Cooperación Tecnológica de la Agencia Internacional de la Energía de Análisis de Sistemas de Tecnología Energética (ETSAP). TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)(IEA-ETSAP, 2020) es un

generador de modelos de optimización para estimar la dinámica energética a largo plazo y con múltiples períodos. Los modelos de optimización TIMES tienen como objetivo suministrar servicios de energía al mínimo coste al tomar simultáneamente decisiones de inversión y operación en equipos, suministro de energía primaria y comercio de energía. Las decisiones de inversión realizadas por los modelos se basan en el análisis de las características de las tecnologías de generación alternativas, en el análisis económico del suministro de energía y en criterios ambientales (Loulou *et al.*, 2005).

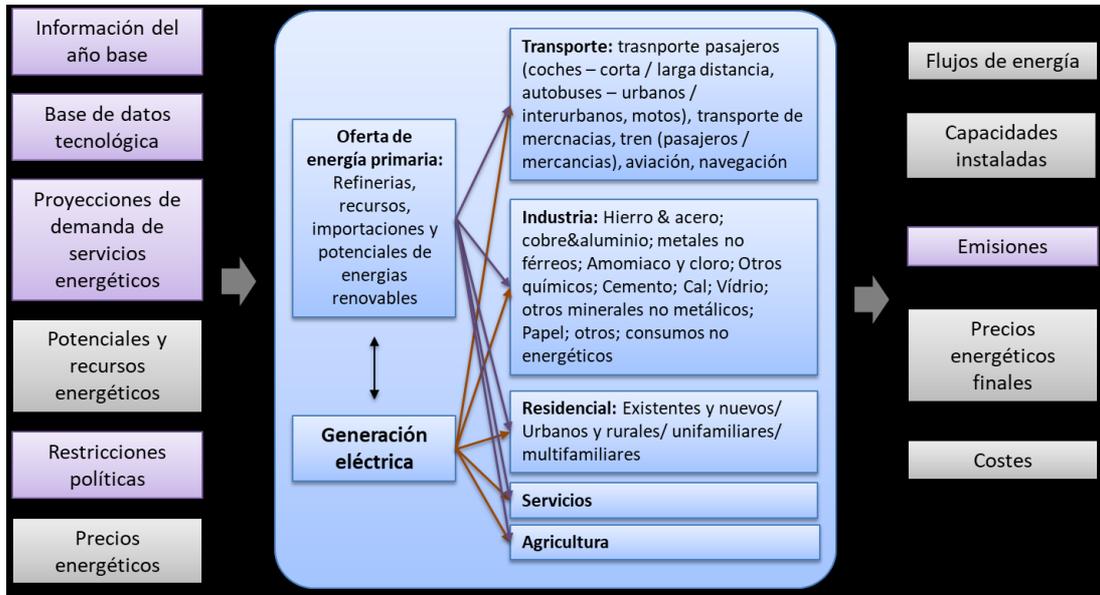
#### **4.2. Descripción breve: introducción cualitativa, formulación matemática esquemática, tipos de datos necesarios, y enlaces a la documentación relevante**

En un modelo TIMES, el procedimiento de optimización encuentra la composición óptima de tecnologías energéticas y combustibles que minimizan el coste total del sistema en todo el horizonte de modelización. Para ello, todos los costes del sistema se descuentan al año base para hallar su valor presente neto. Los costes considerados son los siguientes:

- Costes de capital para invertir y/o dismantelar procesos.
- Costes de operación y mantenimiento fijos y variables.
- Coste de las importaciones y de la producción de recursos energéticos internos.
- Ingresos por exportaciones.
- Gastos de distribución de los productos consumidos.
- Impuestos y subsidios asociados con los flujos de productos básicos, inversiones, etcétera.
- Valor de rescate de procesos y productos al final del horizonte.
- Pérdida de bienestar resultante de la reducción de las demandas de uso final.

Figura 2

## Diagrama esquemático del modelo TIMES-Spain



La función objetivo en TIMES consiste en la minimización de la suma descontada de todos estos costes anuales. La consecuencia de minimizar la función objetivo, sujeto a las limitaciones derivadas de los límites del sistema energético (capacidades existentes, tecnologías y potenciales) y las añadidas por el modelador (límites de emisiones, límites de capacidad, etc.), es la creación de las curvas de suministro que satisfacen la demanda exógena de servicios energéticos (Loulou *et al.*, 2016).

El modelo energético TIMES-Spain ha sido desarrollado por el CIEMAT en el marco de varios proyectos europeos (García-Gusano, 2014; Labriet *et al.*, 2010). TIMES-Spain es un modelo energético de una región utilizado para el modelado del sistema energético español a medio y a largo plazo.

En TIMES-Spain, el sector de suministro de energía consiste en la producción y transformación de combustibles y la producción de electricidad y calor. El modelo contiene datos sobre producción primaria de combustibles fósiles no transfor-

ados, biomasa y combustible nuclear, basados en los potenciales y reservas de recursos energéticos actuales y futuros.

Las transformaciones secundarias consisten en actividades de las refinerías, las plantas de producción de otros combustibles y las tecnologías de producción de electricidad y calor. Esta energía de uso final satisface la demanda de servicios energéticos para los sectores agrícola, residencial, comercial, industrial y de transporte (ver figura 2). Las importaciones y exportaciones de energía también se describen en el modelo. Asimismo, TIMES-Spain contiene datos de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> derivados de la combustión de combustibles, así como algunos factores de emisión extra para procesos sin combustión. El modelo también incluye los potenciales de captura de carbono.

### 4.3. Ejemplo de aplicación

El análisis de escenarios utilizando estos modelos energéticos permiten definir la composición del sistema energético a medio y largo plazo bajo diferentes escenarios políticos y climáticos teniendo en cuenta los futuros desarrollos tecnológicos y la evolución de los costes de las distintas tecnologías.

Permiten, por tanto, anticipar el papel que las distintas tecnologías pueden tener en escenarios energéticos futuros. Estas herramientas son ampliamente utilizadas en las evaluaciones prospectivas de sistemas energéticos por parte de centros de investigación, universidades, organizaciones y administraciones públicas nacionales e internacionales (ver <https://iea-etsap.org/index.php/applications>).

### 4.4. Breve descripción del grupo de investigación y enlaces relevantes

La Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos del CIEMAT (<http://rdgroups.ciemat.es/web/ase/>) centra sus actividades en:

- El análisis de la sostenibilidad de tecnologías energéticas mediante la utilización de las metodologías de Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida que incluye

las dimensiones medioambiental (análisis de ciclo de vida ambiental), social (análisis de ciclo de vida social) y económica (análisis de costes de ciclo de vida). En este último aspecto, la unidad ha trabajado en el desarrollo y aplicación de la metodología de evaluación de externalidades ExterneE (<http://www.externe.info>) a tecnologías energéticas y al transporte.

- El análisis de las implicaciones socioeconómicas de las inversiones en tecnologías energéticas mediante el uso de la metodología de análisis *input output* multirregional y sus extensiones e hibridaciones para evaluar algunos aspectos medioambientales, sociales, económicos y geopolíticos.
- El análisis de políticas energéticas y de cambio climático mediante el uso de metodologías de análisis coste beneficio.
- La modelización de sistemas energéticos nacionales y globales mediante el uso de modelos de optimización de equilibrio parcial del tipo TIMES.

## REFERENCIAS

BANACLOCHE, S., GAMARRA, A. R., LECHON, Y. y BUSTREO, C. (2020a). Socioeconomic and environmental impacts of bringing the sun to earth: A sustainability analysis of a fusion power plant deployment. *Energy*, 209, 118460. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118460>

BANACLOCHE, S., GAMARRA, A. R., TÉLLEZ, F. y LECHÓN, Y. (2020b). Sustainability assessment of future CSP cooperation projects in Europe: MUSTEC deliverable D9.1.

BANACLOCHE, S., HERRERA, I. y LECHÓN, Y. (2020c). Towards energy transition in Tunisia: Sustainability assessment of a hybrid concentrated solar power and biomass plant. *Sci. Total Environ.*, 744, 140729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140729>

GARCÍA-GUSANO, D. (2014). A long-term analysis of the Spanish environmental policies using the life cycle assessment method and enegy optimization modeling.

HERRERA, I., RODRÍGUEZ-SERRANO, I., LECHÓN, Y., OLIVEIRA, A., KRÜGER, D. y BOUDEN, C. (2020). Sustainability assessment of a hybrid CSP/biomass. Results of a prototype plant in Tunisia. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100862>

IEA-ETSAP (2020). Times [WWW Document]. URL <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times> (accessed 11.12.20).

LABRIET, M., CABAL, H., LECHÓN, Y., GIANNAKIDIS, G. y KANUDIA, A. (2010). The implementation of the EU renewable directive in Spain. Strategies and challenges. *Energy Policy*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.015>

LOULOU, R., LEHTILÄ, A., KANUDIA, A., REMME, U. y GOLDSTEIN, G. (2016). Documentation for the TIMES Model. PART II.

LOULOU, R., REMNE, U., KANUDIA, A., LEHTILA, A. y GOLDSTEIN, G. (2005). Documentation for the TIMES Model PART I.

RODRÍGUEZ-SERRANO, I. (2017). *A Framework for Integrated Sustainability Assessment to support decision making. Application to solar thermal and natural gas combined cycle electricity production in Mexico*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.46746>

RODRÍGUEZ-SERRANO, I., CALDÉS, N., RÚA, C. D. L. C. DE LA y LECHÓN, Y. (2017). Assessing the three sustainability pillars through the Framework for Integrated Sustainability Assessment (FISA): Case study of a Solar Thermal Electricity project in Mexico. *J. Clean. Prod.*, 149, pp. 1127–1143.

# Grupo de Investigación en Crecimiento, Demanda y Recursos Naturales (CREDENAT), Universidad de Zaragoza. Modelo EDISON\*, tablas y modelos *input-output* con desagregaciones energéticas para el análisis de políticas

*Raquel Langarita, Cristina Sarasa, Julio Sánchez-Chóliz, Rosa Duarte, Ana Serrano\*\* e Ignacio Cazcarro\*\*\**

## 1. OBJETIVO

EDISON es un paquete conceptual, y especialmente empírico, para tablas de origen y destino (SUTs, en inglés), tablas *input-output* (TIOs), matrices de contabilidad social (MCSs), y modelos *input-output* y de equilibrio general computable (MEGAs o CGEs, en inglés) para el análisis de políticas energéticas. Sus principales características se centran en la desagregación de los sectores energéticos (especialmente eléctricos), o/y el enlace con cuentas satélite de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). EDISON se ha aplicado a nivel de país (España) y regional (Aragón).

Este paquete permite abordar aspectos teóricos y aplicados de análisis socioeconómico y medioambiental. Particularmente, se centra en el análisis de emisiones de GEI, huellas de carbono y efectos asociados a las transformaciones energéticas,

---

\* Energy DISaggregation for pOlicy aNalysis.

\*\* Departamento de Análisis Económico, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Zaragoza.

\*\*\* ARAID (Agencia Aragonesa para la Investigación y el Desarrollo). Instituto Agroalimentario de Aragón (IA2). Departamento de Análisis Económico, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Zaragoza.

así como de sectores específicos como el eléctrico. Los análisis se focalizan en la evolución en el pasado (examinando factores explicativos), y algunos análisis prospectivos para evaluar futuros de transición energética, descarbonización, etc., en España y en el mundo. En este sentido, la herramienta permite evaluar impactos, presiones sociales y medioambientales a través de diferentes escenarios energéticos (en función de cambios en la demanda, en los patrones de consumo, en la configuración de la autoproducción/autoconsumo, etc.) y de políticas concretas (como, por ejemplo, impuestos ambientales o mejoras de eficiencia) que permite observar cómo afectan a los diferentes sectores económicos e institucionales.

## 2. DESCRIPCIÓN

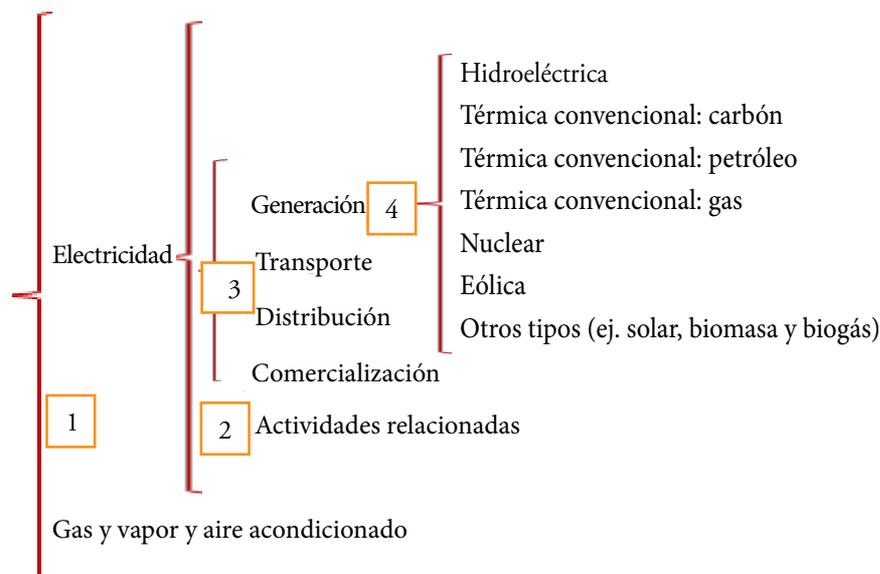
Estas herramientas (que inicialmente se fueron desarrollando por separado, en aplicaciones) han sido principalmente elaboradas para la región de Aragón, para España y, en ocasiones, haciendo uso de otros instrumentos ya desarrollados por grupos internacionales de investigación, como las tablas multiregionales *input-output* mundiales, para el contexto europeo o mundial (así como estudios centrados en España pero con una buena información del comercio internacional).

Los principales aspectos en la desagregación de las cuentas energéticas y de emisiones de gases de efecto invernadero son las cuentas satélite elaboradas y analizadas (ver el apartado 3 y las referencias finales) y la desagregación en el sector eléctrico, que por lo tanto se suma a la estructura base de unas 60 industrias y productos de las economías. La desagregación, especialmente en el sector eléctrico, se elabora a partir de informaciones más detalladas como las obtenidas del INE sobre las macromagnitudes de los subsectores eléctricos, las encuestas de empresas, la estadística de comercio exterior, UNESA, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, EUROSTAT, algunos artículos como Peters (2015), etc. Así, una desagregación informativa, tanto para las SUT, TIO, MCS como MEGA es la representada en la figura 1 que distingue entre las distintas actividades asociadas al sector eléctrico y la consideración de la generación a través de distintas fuentes.

Esta desagregación, que en la actualidad iniciamos ya en las SUT, la podemos trasladar a las TIO y MCS mediante diferentes hipótesis de tecnologías para la modelización como en algunas de las aplicaciones que se presentan en el siguiente

Figura 1

### Desagregación base en EDISON (SUT, TIO, MCS, MEGA)



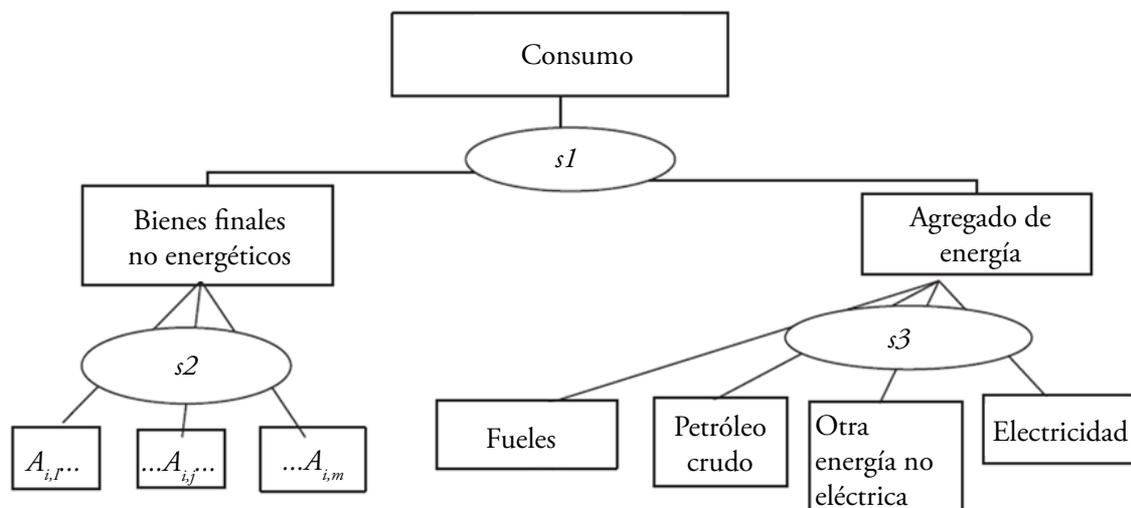
Fuente: Elaboración propia.

apartado. Además, Lenzen y Rueda-Cantuche (2012), ya discutieron las ventajas teóricas y empíricas del uso de SUT en lugar de TIO para determinada modelización analítica. Especialmente para un caso como el eléctrico, con industrias (subsectores, *e.g.* de producción) diferenciadas, pero con un producto que no lo es, esta estructura que hemos implementado en EDISON es particularmente útil. Como se citará al final de la sección 3, con las nuevas SUT desarrolladas podemos construir TIO, obtener diferentes multiplicadores (valor añadido, empleo, emisiones de GEI, etc.) sin tener que aplicar hipótesis adicionales de tecnología (véase Lenzen y Rueda-Cantuche, 2012; Wiedmann, 2017), así como calibrar el módulo de CGEs, etcétera.

Las herramientas y *software* utilizados para el paquete son básicamente hojas de cálculo (Excel), Matlab, y GAMS. Las diferentes versiones de las tablas se suelen manejar en los tres formatos, siendo por lo tanto fácilmente intercambiables. Las computaciones vectoriales y matriciales, especialmente las que requieren más recursos, son implementadas en Matlab por su eficiencia en el manejo de este tipo de datos.

Figura 2

### Ejemplo de estructura anidada simplificada de consumo del tipo que se usa en módulos CGE de EDISON



Fuente: Elaboración propia a partir de Doumax-Tagliavini y Sarasa (2018).

Los módulos/modelos de equilibrio general computables están programados en GAMS y compatibilizan los equilibrios, del mercado de trabajo, gobierno, sector exterior, etc. con diferentes cierres alternativos. Además, se trabaja con estructuras anidadas de producción y de utilidad o de consumo usando formas funcionales flexibles, véase un ejemplo en la figura 2 (según el detalle requerido), donde se calibran, estiman o toman de la literatura elasticidades ( $s_1, s_2, s_3 \dots s_6$ ) para cada nodo.

### 3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Las distintas herramientas que agrupamos en EDISON han sido utilizadas para analizar diferentes momentos del tiempo, problemáticas, planes y estrategias energéticas y climáticas.

Los primeros avances se desarrollaron a partir de TIO y MCSs, *e.g.* en Sánchez Chóliz, Duarte y Mainar (2007), Duarte, Mainar y Sánchez-Chóliz (2010), analizando los impactos ambientales de los hogares en España de forma directa e indirecta. Por el lado sectorial o de determinados sistemas o conjuntos de secto-

res, también se ha ido profundizando en el análisis, como por ejemplo se hizo con el estudio de huellas ambientales (en especial emisiones de GEI) y de escenarios para evaluar los impactos de la industria agroalimentaria en la economía aragonesa, y para el conjunto de España (Cazcarro *et al.*, 2014 y 2015). El análisis de lo ocurrido se complementa con la evaluación más prospectiva, consistente en valorar diferentes caminos o *pathways* sostenibles (Valiño, Sarasa y Duarte, 2019) o examinar las acciones del lado del consumidor en una economía baja en carbono (Duarte, Sánchez Chóliz y Sarasa, 2018b), en ese caso con un CGE dinámico al estilo del módulo de CGE de EDISON.

La perspectiva internacional se ha trabajado conceptual y analíticamente en relación a los objetivos de reducción de emisiones de París y las estrategias de eficiencia energética (Duarte, Sánchez Chóliz y Sarasa, 2018a). Empíricamente, se han tratado también otros países, como en el análisis de políticas que apoyan los biocombustibles y el cambio tecnológico en Francia (Doumax-Tagliavini y Sarasa, 2018) en el artículo de Bolea, Duarte y Sánchez-Chóliz (2020), donde se exploran las emisiones de carbono y la desigualdad internacional con una perspectiva multirregional-multisectorial, o recientemente en Schumacher *et al.* (2020), donde en un compendio de perspectivas sobre la economía del medio ambiente a la sombra del coronavirus, la contribución específica del grupo evalúa los impactos medioambientales, y en especial de los cambios en emisiones en el año 2020, a consecuencia de todos los cambios en los patrones de consumo, movilidad, etc. que se han producido en Europa a raíz de la COVID-19.

Además, aunque no directamente encuadrados actualmente en EDISON, herramientas como los modelos de gravedad aplicados en el marco *input-output* multirregional (ver Duarte, Pinilla y Serrano, 2018c) pueden ser utilizados para evaluar los factores que impulsan o contienen las emisiones de carbono incorporadas en el comercio internacional, realizar proyecciones de las mismas a futuro, analizar el papel de los acuerdos regionales como motor de cambio en los patrones y tendencias de consumo energético y emisiones, así como para estimar elasticidades comerciales sectoriales de aplicación en los MEGA, entre otros.

Centrando el análisis más en el sector eléctrico en España, y el modelo *input-output* desagregado, cabe destacar las aplicaciones a un sector concreto

(Langarita *et al.*, 2017), así como la integración de herramientas de análisis estructural (Duarte, Langarita y Sánchez Chóliz, 2017), que pueden servir para valorar el rol del sector y subsectores en las cadenas de distribución en términos de valor añadido, empleo, arrastre e impulso de otros sectores, etc. De nuevo, con modelización que complejiza las hipótesis, e introduce rigideces en los diferentes mercados, etc., el sistema eléctrico también se ha analizado en un contexto europeo (Langarita *et al.*, 2019).

En la actualidad, estamos trabajando (Cazcarro *et al.*, 2020; Langarita *et al.*, 2020), utilizando la citada desagregación del sector eléctrico en las SUTs mostrando ejemplos de aplicación para evaluar planes o proyecciones a futuro de la autoproducción y autoconsumo energético, especialmente a través de la progresiva entrada de renovables en sustitución de energías fósiles. En el primero de los trabajos, elaboramos conceptualmente y aplicamos ejemplos sintéticos sobre cómo los procesos de autoproducción y autoconsumo pueden tratarse en el marco de las SUT, obteniendo además diferentes multiplicadores sin tener que introducir hipótesis adicionales de tecnología. En el segundo, aplicamos la parte de modelización más flexible para evaluar diferentes escenarios de imposición (principalmente a las energías fósiles) o eliminación de la misma para las renovables.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL GRUPO

CREDENAT (Crecimiento, Demanda y Recursos Naturales) es un grupo de investigación con una trayectoria estable de más de 25 años, conformado principalmente por profesorado e investigadores del departamento de Análisis Económico de la Universidad de Zaragoza. El equipo mantiene sistemáticamente proyectos nacionales y regionales, así como otros europeos y con entidades locales, lo que da lugar a que se disponga de investigadores en formación dentro del equipo. Ha realizado también colaboraciones, proyectos o contratos con diversas empresas e instituciones, como E.ON Renovables, S.L.U., *Joint Research Centre* de la Comisión Europea, Confederación Hidrográfica del Ebro, Comunidad General de Riegos del Alto Aragón, ECODES, etc. El grupo CREDENAT en su conjunto ha sumado en los últimos tres años unas 65 publicaciones indexadas (de las que

43 tienen clasificación Q1 o Q2 en WOS o Scopus), seis capítulos de libro, y más de un centenar de comunicaciones o ponencias en congresos.

## REFERENCIAS

BOLEA, L., DUARTE, R. y SÁNCHEZ-CHÓLIZ, J. (2020). Exploring carbon emissions and international inequality in a globalized world: A multiregional-multisectoral perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104516>

CAZCARRO, I., DUARTE, R., SÁNCHEZ CHÓLIZ, J., SARASA, C. y SERRANO, A. (2014). Environmental footprints and scenario analysis for assessing the impacts of the agri-food industry on a regional economy. A case study in Spain. *Journal of Industrial Ecology*. DOI: 10.1111/jiec.12209

— (2015). Modelling regional policy scenarios in the agri-food sector: A case study of a Spanish region. *Applied Economics*. DOI: 10.1080/00036846.2015.1102842.

CAZCARRO, I., LANGARITA, R., SÁNCHEZ CHÓLIZ, J. y SARASA, C. (2020). Exploring sustainable scenarios for renewable electricity: Analyzing higher electricity self-production and self-consumption using disaggregated supply and use tables. Versión previa presentada en ERSA Web Conference 2020. *Working paper*.

DOUMAX-TAGLIAVINI, V. y SARASA, C. (2018). Looking towards policies supporting biofuels and technological change: Evidence from France. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 94, pp. 430-439. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.03.065

DUARTE PAC, R., LANGARITA TEJERO, R. y SÁNCHEZ CHÓLIZ, J. (2017). The electricity industry in Spain: a structural analysis using a disaggregated input-output model. *Energy*, 141, pp. 2640-2651. DOI: 10.1016/j.energy.2017.08.088.

DUARTE PAC, R., MAINAR, A. y SÁNCHEZ-CHÓLIZ, J. (2010). The impact of household consumption patterns on emissions in Spain. *Energy Economics*, 32(1), pp. 176-185.

DUARTE PAC, R., SÁNCHEZ-CHÓLIZ, J. y SARASA, C. (2018a). The road to Paris with energy-efficiency strategies and GHG emissions-reduction targets: The case of Spain” ISBN: 978-0-415-78740-6. En: O. DEJUÁN, M. LENZEN y M. A. CADARSO (Eds.), *Environmental and economic impacts of decarbonisation*, Chap. 8. New York, USA: Routledge.

— (2018b). Consumer-side actions in a low-carbon economy: A dynamic CGE analysis for Spain. *Energy Policy*, 118, pp. 199-210. 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.03.065.

DUARTE PAC, R., PINILLA, V. y SERRANO, A. (2018c). Factors driving embodied carbon in international trade: a multiregional input–output gravity model. *Economic Systems Research*, 30(4), pp. 545-566. DOI: 10.1080/09535314.2018.1450226.

LANGARITA, R., CAZCARRO, I., SÁNCHEZ CHÓLIZ, J. y SARASA, C. (2020). Modelling fiscal changes for the electricity sector using a computable general equilibrium model for Spain. Presentado en *15<sup>th</sup> Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES*. Working paper.

LANGARITA, R., DUARTE, R., HEWINGS, G. y SANCHEZ-CHOLIZ, J. (2019). Testing European goals for the Spanish electricity system using a disaggregated CGE model. *Energy*, 179, pp. 1288-1301. ISSN 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.175.

LANGARITA, R., SÁNCHEZ-CHÓLIZ, J., SARASA, C., DUARTE, R. y JIMÉNEZ, S. (2017). Electricity costs in irrigated agriculture: A case study for an irrigation scheme in Spain. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68(2), pp. 1008-1019. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.075.

LENZEN, M. y RUEDA-CANTUCHE, J. M. (2012). A note on the use of supply-use tables in impact analyses. *SORT-Statistics Oper. Res. Trans.* 36, pp. 139–152.

PETERS, J. C. (2015). The GTAP-Power Database: Disaggregating the Electricity Sector in the GTAP Database, working paper, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

SÁNCHEZ CHÓLIZ, J., DUARTE, R. y MAINAR, A. (2007): Environmental impact of household activity in Spain. *Ecological Economics*, 62 (2), pp. 308- 318.

SCHUMACHER, I., CAZCARRO, I., DUARTE, R., SARASA, C., SERRANO, A., XEPAPADEAS, A., FREIRE-GONZÁLEZ, J., VIVANCO, D.V., PEÑA-LÉVANO, L.M., ESCALANTE, C.L., LÓPEZ-FELDMAN, A., CHÁVEZ, C., VÉLEZ, M.A., BEJARANO, H., CHIMELI, A.B., FÉRES, J., ROBALINO, J. y SAL, A. (2020). Perspectives on the Economics of the Environment in the Shadow of Coronavirus. *Environ. Resour. Econ.*, 76, pp. 447–517. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00493-2>

VALIÑO, L., SARASA, C. y DUARTE, R. (2019). Economy-wide effects of a sustainable pathway in the pig sector: A case study in Aragon (Spain). *Journal of Environmental Management*, 239, pp. 84-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.041>

WIEDMANN, T. (2017). On the decomposition of total impact multipliers in a supply and use framework. *J. Econ. Struct.*, 6, 11. <https://doi.org/10.1186/s40008-017-0072-0>



# Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Universidad Pontificia Comillas – ICAI. Modelos para el sector eléctrico y el sector energético

*Andrés Ramos, Alberto Campos, Álvaro Sánchez, Carlos Mateo, Fernando de Cuadra, Pedro Linares\**

El Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) es un Instituto Universitario perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Tiene como objetivo primordial promover la investigación y la formación de posgraduados en diversos campos tecnológicos mediante su participación en proyectos concretos de interés para la industria y la Administración.

La vocación del IIT es realizar una contribución a la sociedad mediante la transferencia de sus resultados de investigación. Esta transferencia se articula mediante la realización de proyectos de investigación que pueden ejecutarse bajo diferentes modalidades. Entre ellas, el IIT ofrece un catálogo de productos y servicios que pueden ser adquiridos/contratados directamente por terceros y que se pueden agrupar en dos categorías:

- Herramientas informáticas y
- Servicios de asesoría y consultoría

En el primer grupo se englobarían todos los modelos de ayuda a la decisión que se han desarrollado en el IIT durante los últimos años y que, por ejemplo, son utilizados por las principales empresas del sector eléctrico en su operación diaria tanto en España como en otros países. Estas herramientas se elaboran a medida de las necesidades del cliente y se diseñan aplicando las técnicas más avanzadas del momento (optimización, simulación, gestión de información, etc.) para garantizar la calidad de la solución final. A continuación, se presentan algunos de estos modelos que pueden resultar de utilidad

---

\* Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

para la evaluación de distintos aspectos de la transición energética, desde análisis de fiabilidad hasta prospectiva energética de largo plazo.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de los modelos y de su objetivo principal, que se describen a continuación. Pueden encontrarse más detalles de los modelos, las publicaciones asociadas, y los proyectos en los que se han utilizado, en la web del IIT: [www.iit.comillas.edu](http://www.iit.comillas.edu).

Cuadro 1

Acrónimo	Nombre	Objetivo
MASTER.SO	Model for the Analysis of Sustainable Energy Roadmaps	Planificación energética a largo plazo
FLOP	Modelo de Cálculo de Confiabilidad de un Sistema Eléctrico	Cálculo de la fiabilidad del sistema de generación
CEVESA	Modelo de expansión en generación eléctrica y en el transporte	Planificación de la expansión de la generación. Modelado del impacto de vehículos eléctricos
SPLODER	Smart Planning and Operation of Distributed Energy Resources	Planificación de la expansión de la generación. Modelado de recursos distribuidos
openTEPES	Open Generation and Transmission Operation and Expansion Planning Model with RES and ESS	Planificación de la expansión de la generación, de sistemas de almacenamiento y de la red de transporte. Modelado detallado horario y por centrales individuales
TEPES	Modelo del Plan de Expansión de Transmisión a Largo Plazo para un Sistema Eléctrico	Planificación de la expansión de la red de transporte. Modelado detallado de la red de transporte.
ROM	Reliability and Operation Model for Renewable Energy Sources	Planificación de la operación diaria consecutiva para un año con simulación del uso de las reservas de operación
StarNet	Bulk Production Cost Model	Planificación de la operación semanal a nudo único o con red
REM	Reference Electrification Model	Planificación de la electrificación de un territorio
RNM	Reference Network Model	Planificación de la red de distribución

## 1. MASTER.SO. MODEL FOR THE ANALYSIS OF SUSTAINABLE ENERGY ROADMAPS. STATIC OPTIMIZATION VERSION

El modelo MASTER.SO es un modelo estático que describe el sector energético de manera *bottom-up* (es decir, a partir de los componentes del sistema). Se articula en torno a cinco bloques que describen los distintos niveles de conversión energética, desde las fuentes primarias a los usos finales.

- Fuentes primarias de energía (nuclear, carbón, gas, renovables...).
- Procesos de conversión de la energía (generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, refinado, etc.).
- Transporte de energía a los consumidores de los distintos sectores económicos (a través, por ejemplo, de la red de gas o de transporte y distribución eléctricas).
- Consumos de energía por parte de los sectores de la economía, como pueden ser el sector industrial o el doméstico.
- Usos finales de la electricidad (por ejemplo, para calefacción, iluminación o transporte).

El modelo toma como punto de partida una descripción de la demanda de servicios energéticos (km recorridos, m<sup>2</sup> a calentar), que se introducen exógenamente, y permite satisfacerlas con porcentajes variables de distintas tecnologías. Estas demandas presentan valores que varían en cada escenario. Además, MASTER.SO parte de un sistema energético en el que las únicas infraestructuras que se mantienen con respecto a las presentes en la actualidad son las hidráulicas, las regasificadoras, las refinerías y las redes de distribución eléctricas y de gas. El modelo también incorpora los costes y parámetros técnicos de las diferentes tecnologías, los precios asociados a los combustibles y datos de las tecnologías de usos finales.

El modelo utiliza las fuentes primarias de manera óptima para satisfacer la demanda de usos finales que se ha definido. Para ello, aunque se mantienen las infraestructuras ya mencionadas (hidráulicas, regasificadoras, refinerías y redes de distribución eléctricas y de gas), el modelo puede instalar nueva capacidad de

conversión de la energía (como, por ejemplo, la capacidad de generación eléctrica o de refino). Esta nueva capacidad se instalará en las tecnologías que resulten en la manera más eficiente de satisfacer la demanda de usos finales.

MASTER.SO incluye una versión simplificada del sistema eléctrico, que incluye la operación y la necesidad de reservas. Estas reservas se han supuesto equivalentes al impacto de la pérdida de una central nuclear (1 GW, aproximadamente), más el 4 % de la demanda como error de predicción de la misma, más el 20% de la producción renovable no despachable. Los costes de transporte y distribución de electricidad también se consideran de manera aproximada, infiriendo los costes de esta infraestructura a partir de la cantidad total de energía transportada.

Además, el modelo incluye el potencial de los diferentes tipos de tecnología (lo cual es especialmente interesante para las renovables) y un límite a las emisiones de CO<sub>2</sub> totales del sistema que representa el resultado de las diferentes políticas de reducción de emisiones. Así, el modelo no toma como entrada un determinado precio para el CO<sub>2</sub> (como se hace con el resto de los combustibles), sino que el precio del CO<sub>2</sub> es un resultado de la optimización que hace que el resultado de emisiones totales sea coherente.

A partir de las demandas, los costes y los datos técnicos de partida, el modelo asume que el sistema se adaptará a las restricciones existentes de la manera más eficiente posible desde una perspectiva económica. Con este objetivo, el modelo instala capacidades nuevas y optimiza el uso de las existentes para satisfacer la demanda. Este problema se modela como una optimización lineal (*Linear Programming*, LP) en la que MASTER.SO devuelve como salidas las capacidades instaladas, el uso de energía primaria y de las diferentes tecnologías de usos finales de la energía, los precios de la electricidad o el precio del CO<sub>2</sub>.

El modelo cuenta además con dos versiones ampliadas:

- Versión multicriterio, en la que la función objetivo incluye otros criterios de optimización adicionales al coste.
- Versión agua-energía, en la que se acopla a un modelo hidrológico para realizar una planificación conjunta de los sectores de energía y agua.

El modelo se ha utilizado en diversos proyectos de análisis de impacto en la generación eléctrica de la disponibilidad de recursos hídricos en escenarios de cambio climático y en estudios de prospectiva de escenarios energéticos futuros y del papel del gas en el sector energético español futuro.

## 2. FLOP. MODELO DE CÁLCULO DE CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA ELÉCTRICO<sup>1</sup>

Los índices de confiabilidad en un sistema eléctrico se suelen utilizar para tomar decisiones de planificación de la expansión de la generación en el largo plazo. En mercados desregulados este mecanismo de planificación centralizada se ha sustituido por un mercado que concilia las ofertas y necesidades de reserva de largo plazo y determina un precio de remuneración para las ofertas asignadas.

El cálculo de los índices de confiabilidad es un proceso complejo que debe basarse en métodos probabilistas. La simulación probabilista permite modelar de forma simultánea la incertidumbre en la demanda de electricidad y en la disponibilidad de los grupos de generación, proporcionando los índices de confiabilidad más característicos.

El objetivo del Modelo de Cálculo de Confiabilidad de un Sistema Eléctrico (FLOP) es calcular estos índices:

- Energía Esperada No Suministrada (EENS)
- Probabilidad de Pérdida de Carga (*Loss of Load Probability*, LOLP)

para un conjunto de periodos preespecificados en los que se divide el año. Utiliza el método de la convolución discreta.

Los datos de entrada que utiliza el modelo son:

- Demanda en cada período, modelada por su curva cronológica o monótona.

---

<sup>1</sup> <https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/flop.htm>

- Grupos generadores en cada período: potencia efectiva en la punta y tasa de disponibilidad. Los generadores son despachados para cubrir la demanda en orden de mérito ascendente de acuerdo con la escalera de precios (aunque este orden de despacho es irrelevante a efectos de confiabilidad). El precio sólo tiene efectos informativos mientras no exista un sistema de ofertas de reserva.

Los resultados que proporciona el modelo son:

- Para cada período el valor de la EENS, de la LOLP y del precio (sólo para el proceso de casación de ofertas de reserva de potencia).
- Gráficas de evolución de la EENS y LOLP a lo largo del tiempo.
- Gráfica del precio resultante para cada periodo.

### 3. CEVESA. MODELO DE EXPANSIÓN EN GENERACIÓN ELÉCTRICA Y EN EL TRANSPORTE<sup>2</sup>

CEVESA es un modelo dinámico para la planificación de la expansión de la generación eléctrica del sistema eléctrico español (asumiendo que se representa dicho sistema en un único nodo), que considera tanto las inversiones realizadas por clientes distribuidos en DER (generación y almacenamiento) como por las generadoras (GENCO) en CR (plantas convencionales de generación térmica, generación renovable y almacenamiento centralizado). También representa el sector del transporte al incluir decisiones de inversión en vehículos eléctricos (PEV) y vehículos de motor de combustión interna (CEV), teniendo en cuenta el despliegue de infraestructura, el combustible y los costes sociales y ambientales de ambas tecnologías de transporte. El modelo se basa en un equilibrio en variaciones conjeturales con conjeturas de precio-respuesta, con detalle horario, requisitos de energía y reservas secundarias (calculadas de manera endógena a partir de la producción renovable), y con restricciones de rampa y arranques y paradas. El modelo de equilibrio considera en un único nivel las decisiones de inversión y operación, y se resuelve con un problema de minimización cuadrática equivalente, lo que simplifica su resolución.

<sup>2</sup> <https://www.iit.comillas.edu/oferta-tecnologica/cevesa>

En el sistema eléctrico, las GENCO maximizan sus ganancias esperadas mientras que los clientes minimizan su factura energética considerando las tarifas y las inversiones DER. Ambos problemas están vinculados a través del balance horario de generación-demanda y por la restricción de cobertura de la demanda pico, que garantiza una capacidad de generación suficiente para un cierto nivel de seguridad de suministro. Además:

- Las centrales eléctricas de las GENCO se representan por unidad de oferta, hasta su año de cierre previsto, y las nuevas inversiones se modelan por tecnología. Las GENCO pueden invertir en ciclos combinados, en turbinas de gas de ciclo abierto, en generación eólica y solar fotovoltaica (PV) y en tecnologías de almacenamiento.
- Los clientes distribuidos pueden comprar y vender energía desde y hacia la red, con diferentes tarifas de energía para cada uno de estos dos tipos de transacciones. También se aplica a los clientes un término de potencia tarifaria, proporcional a la potencia máxima extraída o inyectada a la red. Los clientes pueden invertir en tecnologías distribuidas de generación eólica, fotovoltaica y solar y están segmentados en 12 grupos de acuerdo con su sector de actividad (industrial, comercial y residencial) y subsector (alimentos, papel, metalurgia, química para clientes industriales, alimentos, restauración o servicios para clientes comerciales, y unifamiliares o bloques para clientes residenciales). También se representan las pérdidas de distribución de la energía para cada uno de los segmentos de cliente considerados.

En el sector de transporte:

- El coste total del sistema considerando PEV e ICEV se minimiza desde una perspectiva social, siendo el precio de la electricidad la principal variable de salida que vincula los sectores de electricidad y transporte. Los perfiles de uso de los vehículos PEV e ICEV son horarios, lo que permite por ejemplo una representación más precisa de la interacción del PEV con la generación renovable, hidráulica y térmica. Una variedad de estrategias de carga para PEV: carga óptima (para carga y carga) con o sin provisión de reservas (estrategia V2G), entre otras, mejoran la representatividad y el análisis del posible impacto del PEV en el sistema eléctrico.

- Se utiliza además un modelo de coste-beneficio que tiene en cuenta los costes de infraestructura (puntos de recarga, expansión de la red de distribución, etc.) y externalidades (impacto en la salud, cambio climático o dependencia energética) para obtener costes globales y beneficios de las inversiones en PEV e ICEV.

#### **4. SPODER. SMART PLANNING AND OPERATION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES<sup>3</sup>**

El modelo SPODER System es una herramienta de planificación de los recursos, tanto centralizados como distribuidos, de generación y almacenamiento del sistema eléctrico. Esta versión ha sido desarrollada para análisis regulatorios y respaldar las decisiones estratégicas de empresas eléctricas. La función objetivo del modelo minimiza el coste de las inversiones en nuevos recursos tanto centralizados como distribuidos, así como el coste de operación tanto de estas nuevas inversiones como de los recursos ya existentes. La figura 1 representa esquemáticamente los datos de entrada y salida del modelo SPODER SYSTEM. Como entradas al modelo se tienen los parámetros de cada uno de los casos de estudio, y como resultados se obtienen las siguientes variables:

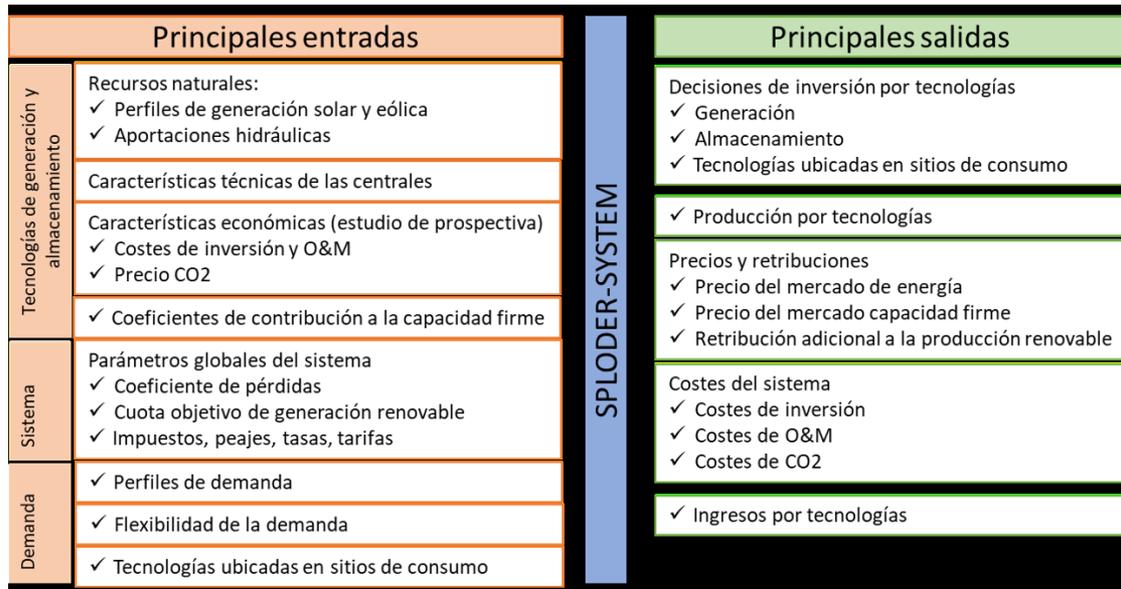
- Instalación de recursos distribuidos más eficientes, teniendo en cuenta las necesidades energéticas eléctricas y térmicas de los consumidores, y teniendo en cuenta el parque de generación centralizada disponible.
- Costes de inversión y operación de recursos distribuidos seleccionados por el modelo.
- Costes del despacho óptimo del parque de recursos instalados para dicho escenario, teniendo en cuenta tanto los recursos distribuidos como centralizados.
- Precio de la energía resultante.

---

<sup>3</sup> El SPODER es una plataforma de modelos computacionales donde dependiendo de los objetivos la unidad de análisis varía desde edificios o microrredes hasta el sistema en su conjunto, para más detalle de esta plataforma ver: <https://www.iit.comillas.edu/oferta-tecnologica/sploder>

Figura 1

## Modelo SPLODER-SYSTEM



- Impacto ambiental.
- Energía consumida e intercambios con el sistema.

El modelo SPLODER-SYSTEM permite identificar variantes de las hipótesis iniciales de penetración de las tecnologías que resulten más eficientes económicamente. Esta posibilidad permite proporcionar conclusiones mucho más robustas ya que los casos estudio escogidos pueden ser revisados en función de estos resultados del modelo y asegurar así que no se está trabajando con escenarios lejanos a las posibilidades que ofrece los recursos distribuidos.

El modelo usará datos que representen un año para estudiar el comportamiento de los recursos y sus costes durante el mismo. Para ello, debido a la selección de días representativos, las tecnologías que permiten algún tipo de almacenamiento incluyen que el estado inicial y final del almacenamiento durante dicho día representativo debe ser el mismo.

Las tecnologías centralizadas como las centrales nucleares, carbón, biomasa, ciclos combinados y ciclos abiertos son caracterizadas con los costes de instalación anualizados, sus costes de operación y mantenimiento (O&M) anuales, sus costes variables (combustibles y O&M variables), costes de arranque y parada, capacidad típica, porcentaje de disponibilidad y sus emisiones, las cuales pueden suponer un coste dependiendo del coste del CO<sub>2</sub> introducido en el modelo.

Tanto la producción de las tecnologías centralizadas renovables (energías de fuente solar o eólica) como la cogeneración se basan en perfiles introducidos. La gestión de la energía hidráulica disponible durante un conjunto de días representativos (típicamente una semana) se basa también en perfiles históricos.

Estas tecnologías además se pueden ver sometidas a dos restricciones adicionales:

- Capacidad firme: se introducen unos porcentajes para todas las tecnologías centralizadas que marcan cuanto se considera su colaboración al pico de demanda del sistema.
- Requisito producción renovable: se introduce el porcentaje de la energía que debe ser producido por fuentes renovables.
- Límite de emisiones: se introduce el máximo valor de emisiones de la generación eléctrica.

SPLORDER-SYSTEM cuenta con el siguiente diseño de tarifas:

- Un porcentaje sobre el precio final para todas las tecnologías (7 %).
- Peajes de acceso €/MWh para todas las tecnologías
- Impuestos específicos €/MWh para el gas y el carbón

En las tecnologías distribuidas se puede seleccionar entre diferentes tecnologías como paneles solares, baterías, bombas de calor o paneles solares híbridos. En todos estos recursos distribuidos se deben introducir las características típicas de cada uno de estos sistemas (eficiencias eléctricas, pérdidas, COP, ...).

Por otro lado, la demanda eléctrica se ha subdividido en distintas regiones y tipos (residencial norte, residencial continental, residencial mediterránea, comercial e industrial). Cada uno se compone de un perfil de consumo base y otro de disponibilidad de vehículos eléctricos y carga asociada.

Para el consumo de climatización residencial, SPLAYER usa un modelo térmico que usa las temperaturas externas, de la zona climática concreta, para saber cuándo tiene que calentar la casa en base a unos requisitos de temperatura interior, de esta forma, se tiene en cuenta la inercia térmica de los edificios.

## 5. OPENTEPES. OPEN GENERATION AND TRANSMISSION OPERATION AND EXPANSION PLANNING MODEL WITH RES AND ESS<sup>4</sup>

El modelo determina los planes de inversión en nuevas instalaciones (generadores, sistemas de almacenamiento y líneas) para suministrar la demanda a coste mínimo. La planificación táctica se relaciona con las decisiones en horizontes de 10 a 20 años. El objetivo es determinar la generación futura, los sistemas de almacenamiento y las necesidades de red. Los resultados principales serán las guías para la estructura futura del sistema de generación y de la red.

El modelo presenta un sistema de apoyo a las decisiones para determinar el plan de expansión de la generación y de la red de un sistema eléctrico de gran escala a nivel táctico. Los generadores, sistemas de almacenamiento o líneas candidatas deben ser definidas por el usuario y el modelo determina las decisiones óptimas entre los candidatos definidos por el usuario. Determina automáticamente los planes de expansión óptimos que satisfacen simultáneamente varios atributos. Sus características principales son:

- *Estático*: el alcance del modelo es un único año en un horizonte de largo plazo, por ejemplo 2030 o 2040.

Representa jerárquicamente los diferentes alcances temporales para tomar las decisiones en un sistema eléctrico:

<sup>4</sup> <https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/openTEPES/index.html>

- Período: un año.
- Nivel de carga: horas por ejemplo de h0001 a h8760 o 01/01/2030 00:00 a 30/12/2030 23:00.

Esta división temporal permite la representación de los periodos para evaluar la operación del sistema. Adicionalmente, el modelo puede ejecutarse con periodos cronológicos bihorarios, trihorarios, etc. para disminuir la carga computacional sin pérdida significativa de precisión.

- *Estocástico*: considera diversos parámetros que pueden afectar las decisiones de inversión en generación y en red. Son escenarios anuales de medio plazo relacionados con la operación del sistema. Estos escenarios de operación están asociados a las renovables y a la demanda eléctrica.

La función objetivo incorpora los dos principales costes cuantificables: coste de inversión en generación y en red (CAPEX) y los costes variables esperados de operación (que incluyen los costes de emisiones y de fiabilidad) (OPEX del sistema).

El modelo formula un problema de optimización estocástico que incluyen variables binarias de inversión en generación y en red y variables de operación (las de acoplamiento, arranque y parada también son binarias).

La representación de la operación es *una asignación de unidades con restricciones de red* basada en una formulación *fuerte y compacta* incluyendo reservas de operación y un *flujo de cargas en DC* como modelo de red. Las pérdidas óhmicas se consideran proporcionales al flujo en la red. Permite modelar diferentes *sistemas de almacenamiento*, como son el bombeo puro y mixto, baterías, etc. Permite analizar el balance entre inversiones de generación y/o red y la inversión o uso de la capacidad de almacenamiento.

Los resultados principales del modelo se pueden clasificar en:

- *Inversiones*: decisiones de inversión en generación, sistemas de almacenamiento y líneas y su coste.

Figura 2

## Red de transporte europea



- *Operación*: producción de las diferentes centrales y su agrupación por tecnologías (térmica, hidráulica, bombeo, renovable), el vertido de las renovables, flujos por la red, pérdidas óhmicas, ángulos de tensión en los nudos.
- *Emisiones*: emisiones de CO<sub>2</sub> por grupo.
- *Marginal*: costes marginales de corto plazo por nudo.

El modelo se ha implantado de manera cuidadosa para evitar problemas numéricos escalando los parámetros, variables y ecuaciones del problema de optimización para que se pueda utilizar con casos de gran escala, *e.g.*, el sistema europeo con detalle horario.

## 6. TEPES. MODELO DEL PLAN DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN A LARGO PLAZO PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO<sup>5</sup>

- Determina los planes de inversión óptimos en nuevas líneas o circuitos para suministrar la demanda prevista con el coste mínimo en un horizonte de

<sup>5</sup> <https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/TEPES.htm>

decisiones tácticas a 10-20 años. Los resultados sirven de guía para determinar la futura estructura de la red de transporte a gran escala. Los circuitos candidatos pueden ser definidos por el usuario y el modelo selecciona las decisiones óptimas entre ellos o bien el modelo es capaz de determinar automáticamente estos candidatos. Los circuitos candidatos pueden ser líneas HVAC o HVDC.

Las principales características del modelo son:

- *Dinámico*: el alcance del modelo puede ser de varios años en el horizonte de largo plazo, 2030 o 2035.

Dentro de cada año se representan jerárquicamente diferentes alcances temporales para la operación del sistema eléctrico: año, periodo, subperiodo y nivel de carga. De esta manera se puede representar de manera flexible los periodos donde evaluar la operación del sistema. Por ejemplo, horas equivalentes aisladas temporalmente o bien conjunto de días representativos.

- *Estocástico*: se consideran diversos parámetros estocásticos que pueden afectar las decisiones de expansión de la red. Se consideran escenarios de operación y de fiabilidad. Los de operación se asocian a incertidumbre en: producción renovable, demanda, aportaciones naturales y costes de combustible. Los de fiabilidad corresponden a contingencias N-1 de generación y de red.

La función objetivo incluye los costes fijos de inversión en la red de transporte, los costes variables de operación (incluyendo los costes de las emisiones) y los costes de fiabilidad asociados a las contingencias N-1 de generación y de red.

El problema de optimización se resuelve mediante el método de descomposición de Benders lo cual permite la resolución de problemas de muy gran tamaño. En este método el problema maestro propone decisiones de inversión en red y los subproblemas de operación determinan el coste de operación para esas decisiones de inversión propuestas y los subproblemas de fiabilidad la energía no suministrada asociada a las contingencias. El modelo de operación se basa en un flujo de carga en DC considerando líneas en AC y DC y con las pérdidas de red evaluadas mediante una poligonal. Las decisiones de inversión en red son binarias y la red existente se considera como punto de partida para expansión del sistema.

Los resultados principales del modelo se pueden agrupar en estos ítems:

- *Inversión*: decisiones de inversión en red y sus costes.
- *Operación*: resultados de producción por cada generador y agrupados por tecnologías (térmica, hidráulica, bombeo, renovable), consumo de combustible, vertido de VRE, vertido hidráulico, gestión hidráulica, flujos por la red, pérdidas óhmicas, ángulos de tensión en los nudos.
- *Emisiones*: emisiones de CO<sub>2</sub>.
- *Marginal*: costes marginales de corto plazo (SRMC) y factores de carga de la red (TLF).
- *Fiabilidad*: energía no suministrada.

Los resultados se agrupan por nudo, zona área y región.

## 7. ROM. RELIABILITY AND OPERATION MODEL FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES<sup>6</sup>

El objetivo del modelo es determinar el impacto técnico y económico de la generación variable (Variable Renewable Energy VRE) y otros tipos de tecnologías emergentes (gestión activa de la demanda, vehículos eléctricos, generación termosolar, generación fotovoltaica) en la operación del sistema a medio plazo incluyendo la fiabilidad. Los resultados son la producción de los generadores incluyendo vertido eólico, utilización de las centrales hidráulicas y de bombeo y medidas de fiabilidad. Los beneficios derivados de mejoras en las predicciones de la VRE se pueden determinar cambiando los errores de predicción y reejecutando el modelo.

A continuación, se listan las principales características del modelo:

- *Modelo de optimización estocástica diaria seguido por una simulación horaria secuencial.*

---

<sup>6</sup> <https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/ROM.htm>

En este modelo de programación diaria estocástica se incluyen restricciones de operación detalladas como mínimo técnico, rampas de subida y bajada y mínimo tiempo de funcionamiento y de parada de los grupos térmicos. La simulación horaria se ejecuta para el mismo día para considerar los errores de predicción de la VRE y de la demanda y el fallo de los grupos y reevaluar los resultados anteriores. Este modelado del sistema en doble etapa reproduce el mecanismo habitual de decisión del operador del sistema.

La red de transporte se representa mediante un flujo de cargas en DC con las pérdidas óhmicas aproximadas mediante una poligonal.

- *Una ejecución cronológica para evaluar cada día del año.*

Las decisiones por encima de este alcance como la gestión de la operación del bombeo semanal se hacen internamente en el modelo mediante criterios heurísticos. La gestión anual de las centrales hidráulicas viene decidida por modelos de jerarquía superior como, por ejemplo, un modelo de coordinación hidrotérmica.

- *La estocasticidad de la VRE y de las aportaciones hidráulicas se considera para múltiples escenarios mediante simulación de Monte Carlo.*

El esquema del modelo basado en una secuencia diaria de planificación y simulación es similar al de un control en ciclo abierto utilizado en teoría de control.

El modelo ha sido utilizado ampliamente en numerosos proyectos de investigación europeos y nacionales con diferentes sistemas eléctricos. En particular, ha sido utilizado en la elaboración de los planes energéticos nacionales.

## 8. STARNET. BULK PRODUCTION COST MODEL<sup>7</sup>

Un modelo de explotación generación/red determina las variables de funcionamiento que definen la explotación del sistema que minimiza los costes variables de explotación para el alcance temporal definido. El modelo determina las decisiones binarias de asignación de los grupos de generación, así como sus produc-

<sup>7</sup> <https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/starnet.htm>

ciones y los flujos de potencia a través de la red. Se trata de un modelo de corto y medio plazo. En el corto plazo la demanda es modelada cronológicamente, mientras que en el medio plazo se trata como monótona.

También se puede considerar como modelo de programación semanal generalizada (*Generalized Unit Commitment GUC*) ya que resuelve simultáneamente los problemas de:

- *Asignación de grupos (Unit Commitment UC)*

Decide qué grupos térmicos de generación deben ser arrancados y parados y cuándo.

- *Despacho económico hidrotérmico (Hydrothermal Economic Dispatch. HED)*

Decide qué potencia debe producir cada grupo de generación (térmico o hidráulico) en cada intervalo de tiempo teniendo en cuenta la limitación de energía producible de los embalses hidráulicos.

- *Flujo de cargas óptimo (Optimal Power Flow. OPF)*

Decide qué flujos circulan por los circuitos de la red modelada como flujo de cargas en DC donde se ignoran los niveles de tensión y la potencia reactiva.

También se puede considerar como modelo de coste de explotación generación/red (Bulk Production Cost Model BPCM) de medio plazo para realizar previsiones económicas y de funcionamiento de los grupos de generación.

Este modelo ha sido utilizado por el operador del sistema de la República Dominicana.

## 9. REM. REFERENCE ELECTRIFICATION MODEL<sup>8</sup>

El modelo REM (Reference Electrification Model) incluye dos versiones, una para planificar la electrificación masiva de grandes territorios, y otra (llamada LREM)

<sup>8</sup> <https://www.iit.comillas.edu/oferta-tecnologica/rem>

para ayudar en el desarrollo de proyectos locales de electrificación (microrredes, típicamente aisladas de la red principal).

La información necesaria para resolver estos problemas de electrificación es muy diversa y detallada. Hace falta, por ejemplo:

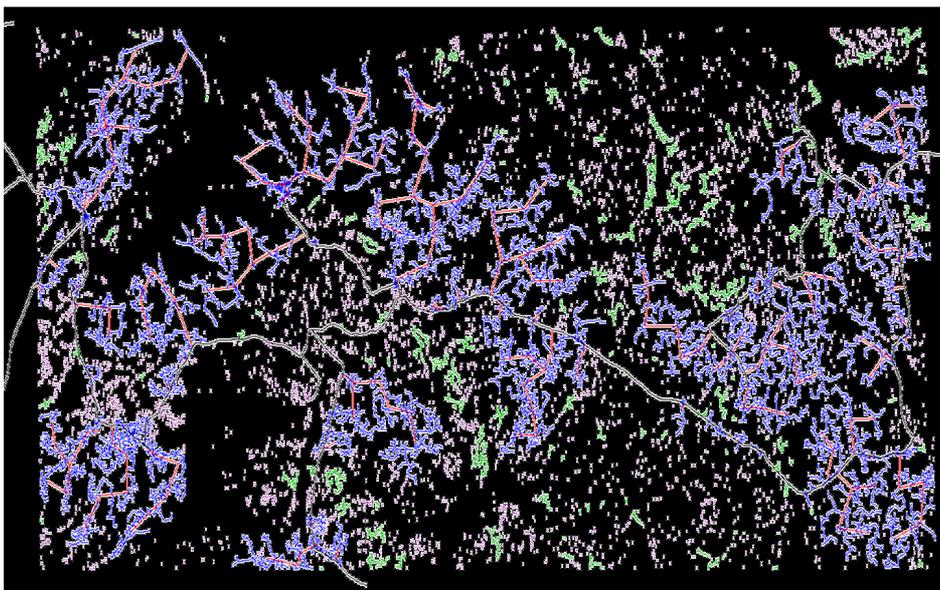
- Estimar la demanda, a nivel de consumidor individual (tipo de consumidor y perfil de consumo, localización geográfica).
- Información sobre recursos energéticos (irradiación solar, disponibilidad y coste de diésel).
- Características geográficas que afecten al tendido de líneas eléctricas y su coste (topografía, zonas prohibidas o penalizadas).
- Características y localización de la red de media y alta tensión existente (localización de puntos de conexión potenciales, coste y fiabilidad).
- Catálogo de componentes de generación y almacenamiento (paneles solares, baterías, generadores diésel, electrónica asociada).
- Catálogo de componentes para nuevas redes (líneas y transformadores).
- Parámetros financieros, sociales y técnicos que definan los criterios de optimización.

El modelo más general –electrificación de grandes áreas– incluye algoritmos de *clustering* y optimización que permiten determinar la mejor forma de cubrir la demanda, diseñando las soluciones en detalle. Los consumidores pueden quedar conectados a la red principal, o bien formando microrredes aisladas, o incluso aislados –asignándoles sistemas individuales de distintos tamaños y configuraciones, según su demanda. En la figura 3 se muestra un ejemplo de solución: los conectados en azul, microrredes en verde, y el resto son consumidores aislados.

La solución proporcionada es la de mínimo coste, traduciendo la calidad de servicio a costes de energía no suministrada. El usuario puede probar con distintos

Figura 3

### Electrificación de una red



criterios, catálogos de componentes, preferencias, escenarios y parámetros, para ayudar a una planificación robusta, basada en datos objetivos y análisis de sensibilidad.

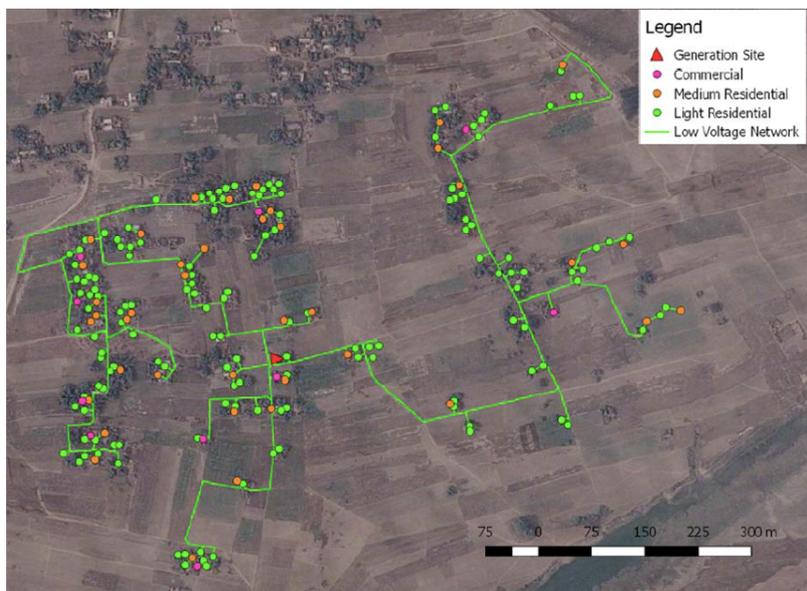
Para complementar al modelo se han desarrollado herramientas auxiliares, tales como analizadores de imágenes de satélite para identificar edificios, generadores de perfiles de demanda en función de uso de aparatos, o procesadores de resultados para facilitar la generación de informes. Los diseños de salida son georreferenciados, y pueden representarse sobre una herramienta GIS.

El modelo REM es único en su tipo: ningún otro modelo de planificación masiva de electrificación, existente hasta la fecha, es capaz de llegar al nivel de granularidad de consumidores individuales (cientos de miles) y de diseño detallado de redes e instalaciones de generación/almacenamiento de microrredes.

El modelo LREM usa parte de las funcionalidades de REM para centrarse en el diseño detallado de soluciones locales, de tamaño mucho más reducido (del

Figura 4

## Electrificación de una red local



orden de cientos o miles de consumidores). Por eso permite un nivel de detalle aún mayor, por ejemplo, en cuanto al número de tipos de consumidores distintos, los modelos financieros que maneja, o el trazado detallado de redes siguiendo de las calles/caminos de una aldea (véase la figura 4).

LREM incluye las siguientes características relevantes:

- Optimización conjunta de la inversión en generación y red, y la operación (despacho).
- Análisis financiero que puede ajustarse específicamente para proyectos de microrredes rurales.

LREM puede usarse para estudios de ingeniería preliminares, con su estimación de costes, y por tanto para analizar posibilidades de inversión/concesión y viabilidad a medio plazo (útil por tanto para emprendedores e inversores en países en desarrollo, además de para grandes compañías distribuidoras, ONG o administraciones).

## 10. RNM. REFERENCE NETWORK MODEL<sup>9</sup>

El Reference Network Model (RNM) es un modelo de planificación de redes eléctricas de distribución de gran escala. Hay dos grandes tipos de versiones, *greenfield* y *brownfield*, cada una de ellas con algunas variantes asociadas a proyectos e interfaces concretos.

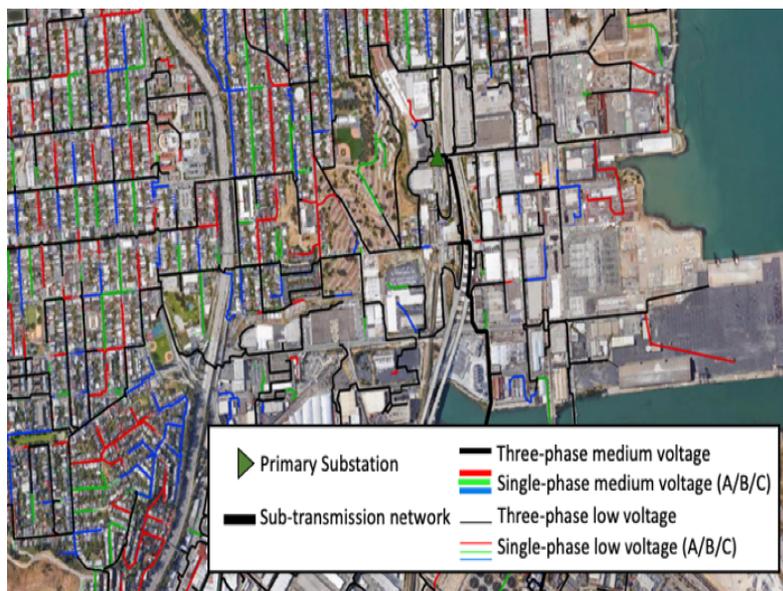
- Las versiones *greenfield* generan redes pseudoóptimas incluyendo alta, media y baja tensión, que conectan subestaciones de transporte con consumidores individuales (varios cientos de miles de consumidores en un solo caso, varios millones combinando casos). Estas redes de distribución eléctrica sintéticas –pero muy realistas– pueden servir como caso de estudio para evaluar algoritmos eléctricos (por ejemplo, flujos de carga), o para facilitar estudios detallados de todo tipo, con resultados cuantitativos extrapolables a redes reales. Se ha utilizado a menudo como estimador de una red real desconocida, partiendo de la localización de los edificios y de las subestaciones de transporte. De hecho, su origen se debe a la necesidad de estimar objetivamente los costes asociados a la distribución eléctrica en una región dada, independientemente de las particularidades o historia de la empresa encargada de dicha distribución.
- Las versiones *brownfield* (o incrementales) parten de una red inicial sobre la que se diseñan escenarios de expansión futuros, variando elementos de la red como consumo/generación, nuevos clientes o la incorporación de recursos energéticos distribuidos. El objetivo de un modelo *brownfield* es evaluar el impacto técnico y económico de conectar elementos adicionales a una red de distribución existente.

RNM se ha utilizado tradicionalmente para modelar redes europeas. Recientemente se ha desarrollado también la versión RNM-US de la versión *greenfield* adaptada para redes en Norteamérica, que modela sus características diferenciadoras como los alimentadores monofásicos, las configuraciones específicas de los transformadores de distribución y de la red de baja tensión (secundarios), o el uso masivo de reguladores de tensión. El modelo se ha utilizado –por ejemplo– para diseñar una red de distribución sintética en la bahía de San Francisco con

<sup>9</sup> <https://www.iit.comillas.edu/oferta-tecnologica/rnm>

Figura 5

## Planificación de la red de distribución



10 millones de nudos eléctricos. Siendo la red de gran escala, las redes diseñadas por el modelo tienen mucho detalle.

El modelo RNM puede utilizarse tanto directamente a partir de los clientes como identificando la localización de los clientes a partir de callejeros disponibles en la red. Las redes diseñadas por el modelo pueden superponerse a imágenes de satélite o callejeros reales (véase figura 5). El modelo construye la red de abajo a arriba, partiendo de la localización y demanda de los clientes, localizando y dimensionando centros de transformación para abastecerlos, diseñando la baja tensión, localizando y dimensionando subestaciones, y diseñando finalmente la red de media y alta tensión.

Debido a su gran potencial, capacidad y robustez, el modelo RNM se ha utilizado en múltiples proyectos y estudios, tanto en el IIT como en otras instituciones (como por ejemplo el MIT).

# TECNALIA Research and Innovation.

## Herramienta ENERKAD, modelo LEAP

*Diego García-Gusano, Eneko Arrizabalaga y Patxi Hernández\**

La plataforma de Planificación Energética de TECNALIA viene desarrollando desde hace casi diez años el área de especialización en planificación energética prospectiva a escala ciudad y región (subnacional).

En el marco de varios proyectos europeos del tipo *Smart Cities and Communities Lighthouse Projects*, y dentro del programa Horizonte 2020, se han desarrollado trabajos relacionados con los análisis energéticos basados en dos herramientas de modelado.

Por un lado, la herramienta ENERKAD (<https://www.enerkad.net/>), cocreada por TECNALIA, sirve para llevar a cabo la caracterización energética detallada de los edificios de una ciudad, así como para evaluar potenciales escenarios de descarbonización de dicha ciudad. Se basa en los llamados *Building Stock Models* (BSM) y permite calcular en base horaria la demanda de energía, los consumos energéticos y las emisiones ambientales asociadas a dicho consumo para cada edificio de una ciudad, utilizando datos del catastro y de cartografía básica. Estos datos son combinados con información como las características de la envolvente de los edificios, los patrones de consumo y la información climática de la zona entre otros, para caracterizar el modelo en su totalidad. En los diversos proyectos H2020 se ha trabajado profundamente tanto en la configuración de los *Positive Energy Districts* (PED) como en la identificación de edificios y áreas de la ciudad prioritarias a la hora de abordar medidas.

Por otro lado, se ha venido desarrollando un *expertise* en el modelado energético prospectivo de los sistemas energéticos de ciudades europeas, apoyado en el uso del *software* LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*) (<https://leap.sei.org/>), una herramienta de simulación basada en la evolución de los balances energéticos

---

\* Plataforma de Planificación Energética, Área de Eficiencia Energética y Sostenibilidad Industrial, División de Energía y Medio Ambiente, TECNALIA.

desarrollada por el Stockholm Environment Institute y utilizada por miles de instituciones, centros de investigación y gobiernos por todo el mundo.

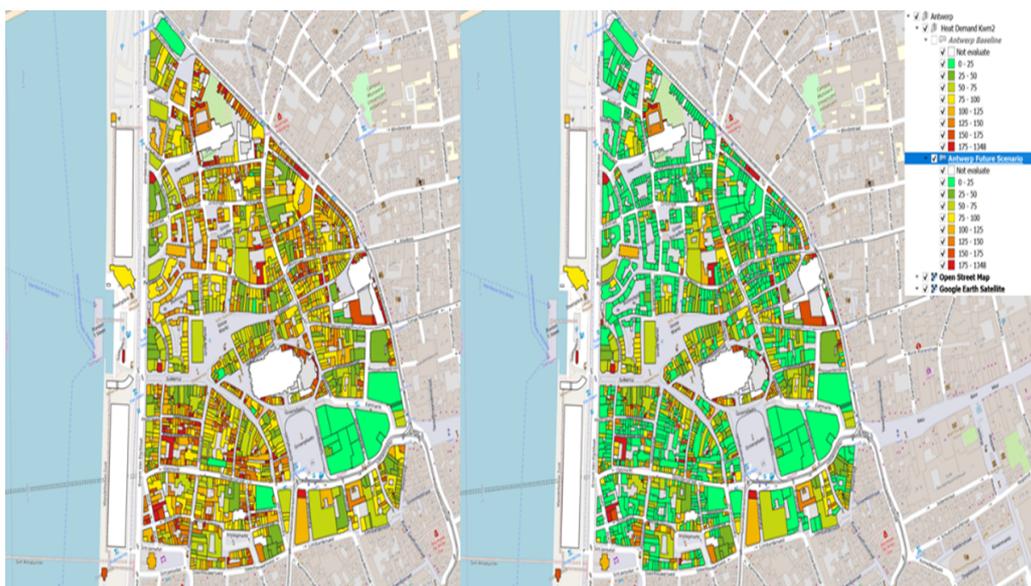
## 1. SOBRE ENERKAD Y LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS

ENERKAD es una herramienta de evaluación energética de escenarios urbanos que realiza simulaciones energéticas y ambientales. Mediante simulación energética ENERKAD calcula la demanda y el consumo de energía anual y horario a nivel de edificio, distrito o ciudad, lo que permite el análisis y comparación de escenarios actuales y futuros basados en la aplicación de diferentes estrategias.

Posee una interfaz fácil de usar basada en QGIS, facilitando la visualización de los resultados obtenidos, ayudando a la toma de decisiones para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> fomentando la sostenibilidad.

Figura 1

**Ejemplo de caracterización energética de los edificios (consumo total de energía kWh/m<sup>2</sup>) de Amberes (Bélgica) entre el estado presente (izquierda) y un escenario futuro (derecha)**



Fuente: Elaboración propia.

En concreto, se han realizado análisis profundos para más de 30 ciudades europeas. En la figura 1 se puede ver la comparativa de Amberes a nivel de toda la ciudad en dos estados: a la izquierda el análisis energético de los edificios en el presente y a la derecha tras realizar intervenciones de mejora (eficiencia, gestión avanzada, implementación renovable, cambio de equipos...).

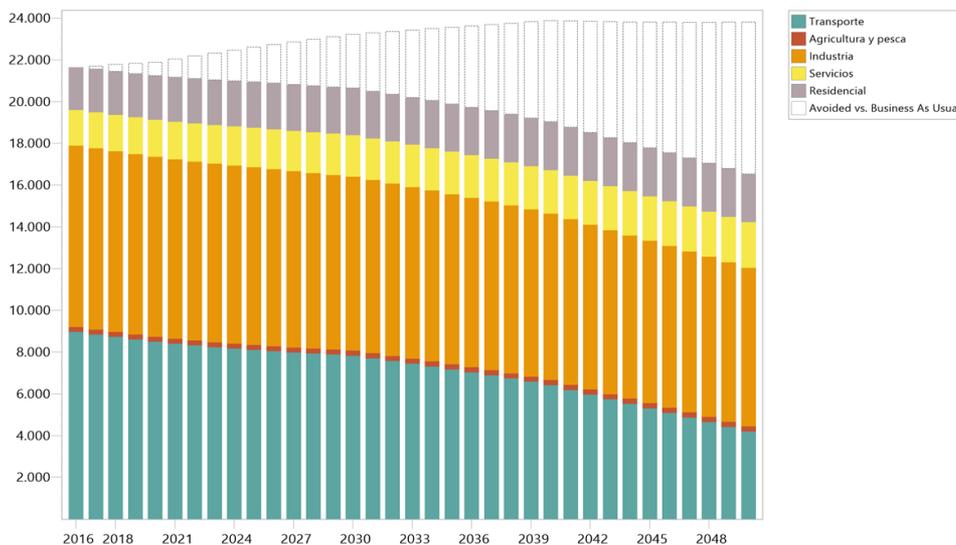
## 2. SOBRE LEAP, OSEMOYS LA MODELIZACIÓN PROSPECTIVA

LEAP es un marco de modelado energético sencillo y versátil que permite el testeado rápido de medidas y políticas con relativamente un bajo volumen de datos. En el caso de las ciudades, y a diferencia de los países, el acceso a estadísticas ‘macro’ del comportamiento energético urbano es complejo. Por esos motivos, y por la sencillez a la hora de realizar simulaciones, LEAP permite observar el comportamiento energético de las ciudades tanto en sus demandas como en el lado de la producción de energía (habitualmente generación eléctrica). En el caso de TECNALIA, se han venido realizando en los últimos años los modelos energéticos (y de emisiones GEI) de más de 30 ciudades por toda Europa, desde municipios en torno a 20.000 habitantes hasta grandes capitales de millones de personas.

Asimismo, LEAP permite el acople con OSeMOSYS (*Open Source Energy Modelling System*, <https://github.com/OSeMOSYS/OSeMOSYS>) con una amplia comunidad de trabajo colaborativo, así como NEMO (*Next Energy Modeling system for Optimization*, <https://github.com/sei-international/NemoMod.jl>). Tanto OSeMOSYS (basado en el lenguaje GNU MathProg) como NEMO (basado en JULIA) nos permiten ir más allá de las capacidades de LEAP y habilitan el llevar a cabo la optimización (minimización de costes sujeta a restricciones) tecnoeconómica del sistema energético, equivalente a otros entornos de modelado convencionales a escala nacional/supranacional como MESSAGE, TIMES, PRIMES, etc. La figura 2 muestra un ejemplo de comparación de un escenario con medidas de descarbonización en el transporte frente a un escenario tendencial.

Figura 2

## Ejemplo de reducción de la energía final (GWh) en el caso de aplicar un escenario con medidas en el transporte en una región de España



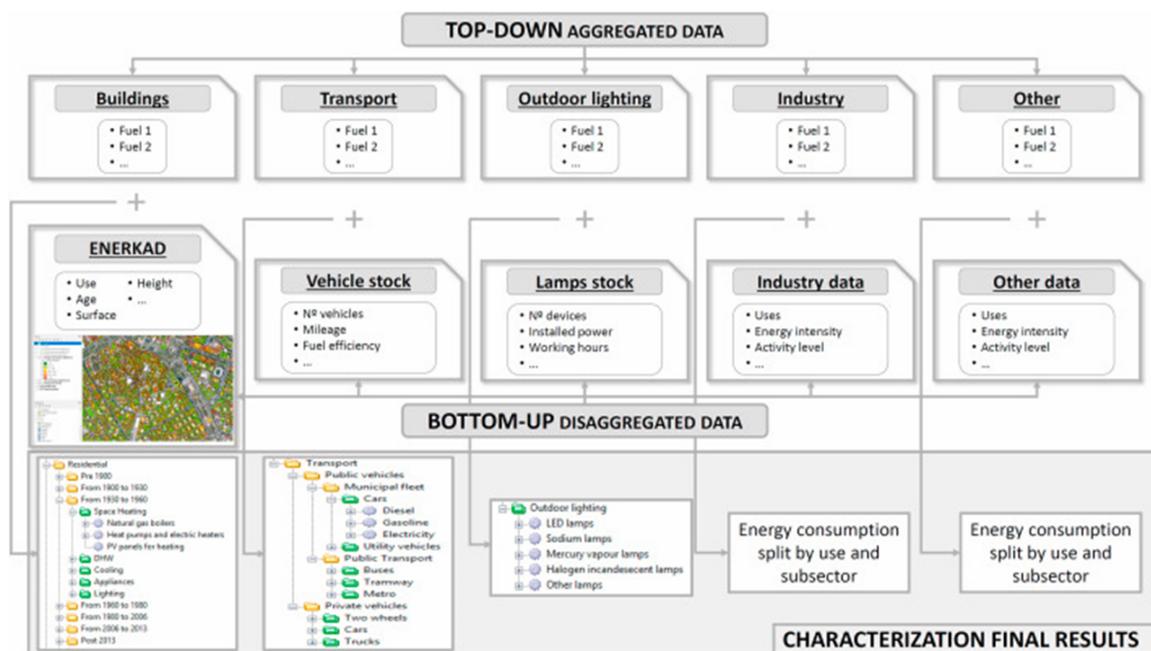
Fuente: Elaboración propia.

### 3. HACIA UNA METODOLOGÍA INTEGRAL DE ANÁLISIS ENERGÉTICO A ESCALA SUBNACIONAL/ CIUDAD

El desarrollo paralelo del enfoque “micro” que proporciona ENERKAD a la hora de caracterizar los BSM de una ciudad es de gran utilidad para solventar las carencias que las estadísticas urbanas presentan cuando se trata de describir los consumos y las demandas de sectores relevantes como el residencial y el terciario, principalmente. Así, la unión del modelado detallado que permite ENERKAD complementa el modelado “macro”, habitualmente basado en estadísticas, estudios y aproximaciones desde el nivel nacional. En este sentido, los *outputs* de ENERKAD se convierten en *inputs* de LEAP, confiando al proceso de modelado una estrategia *soft-link* de unión entre modelado *top-down* (LEAP) y *bottom-up* (ENERKAD). Esto se puede apreciar en el trabajo desarrollado por Muñoz *et al.* (2020) y publicado en *Energy Strategy Reviews* (figura 3).

Figura 3

## Caracterización energética multinivel de una ciudad



Fuente: Muñoz *et al.* (2020).

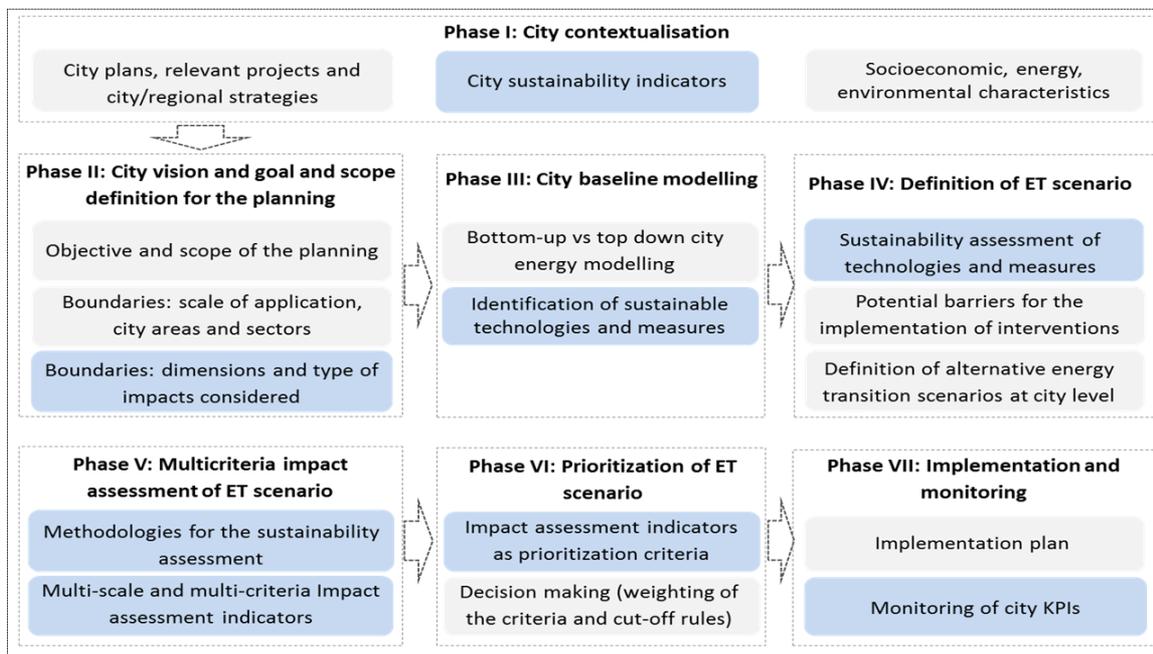
Asimismo, dicha estrategia de modelado se engarza en un método más amplio de trabajo desarrollado por TECNALIA en los proyectos Horizonte 2020 para, con ello, facilitar su uso por parte de los agentes implicados (responsables políticos, técnicos municipales, agentes sectoriales, empresas involucradas, etc.). La figura 4 muestra el esquema conceptual de modelado y desarrollo de planificación energética urbana.

Como se puede apreciar en la figura 4, el proceso de trabajo no solo incluye los desarrollos de ENERKAD (fases 2-3) y LEAP-OSeMOSYS (fases 3-4), sino otras metodologías como los métodos de análisis multicriterio para ayuda a la toma de decisiones (fase 5-6).

Además, más allá del ámbito de la ciudad, cabe reseñar que TECNALIA ha llevado a cabo sendos proyectos para desarrollar planificación energética a escala

Figura 4

## Concepto para el desarrollo de planes energéticos urbanos a largo plazo



Fuente: Arrizabalaga, García-Gusano y Hernández (2021).

regional. Tales son los casos de la estrategia Gipuzkoa 2050 así como el desarrollo completo del Plan Extremeño Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

## 4. ALGUNOS PROYECTOS DE INTERÉS

Los referidos proyectos Horizonte 2020 en los que TECNALIA viene desarrollando modelizaciones son: MakingCity (<http://makingcity.eu/>), MAtchUP (<https://www.matchup-project.eu/>), mySMARTLife (<https://www.mysmartlife.eu/>) y ATELIER (<https://smartcity-atelier.eu/>).

- Para más información sobre la plataforma de Planificación Energética: <https://redmentes.es/somos/tecnalia/>
- Para más información sobre TECNALIA: <https://www.tecnalia.com/es/>

## REFERENCIAS

ARRIZABALAGA, E., GARCÍA-GUSANO, D. y HERNÁNDEZ, P. (2021). Toward sustainable long-term energy planning for cities: an economic and environmental assessment of sustainable fuel technologies in the city of Donostia-San Sebastián. En: S. DUTTA y C. M. HUSSAIN, *Sustainable Fuel Technologies Handbook* (pp. 483-510). Academic Press, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00017-2>

MUÑOZ, I., HERNÁNDEZ, P., PÉREZ-IRIBARREN, E., PEDRERO, J., ARRIZABALAGA, E. y HERMOSO, N. (2020). Methodology for integrated modelling and impact assessment of city energy system scenarios. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100553. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100553>



Información Publicaciones / Publications Information:

Funcas  
Caballero de Gracia, 28  
28013 Madrid  
España / Spain  
Tfno. / Phone: +34 91 596 54 81  
Fax: +34 91 596 57 96  
[publica@funcas.es](mailto:publica@funcas.es)

P.V.P.: Suscripción anual papel, 25 € (IVA incluido)  
Edición digital, gratuita



ISSN: 2445-2726  
Deposito Legal: M-7537-2016