

Pablo Vte. Torralba Pérez



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Master en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Trabajo fin de máster

Descripción y análisis crítico de cinco modelos dinámicos energéticos tradicionales: LEAP, TIMES, PRIMES, WoLim y RETScreen. Propuesta de un nuevo modelo energético dinámico que incluya variables económicas, tecnológicas, medioambientales y sociales

Tutora del proyecto:
Alicia Valero



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Pablo Vte. Torralba Pérez,

con nº de DNI 44873801-L en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster

Descripción y análisis crítico de cinco modelos dinámicos energéticos tradicionales: LEAP, TIMES, PRIMES, WoLiM y RETScreen. Propuesta de un nuevo modelo energético dinámico que incluya variables económicas, tecnológicas, medioambientales y sociales

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 25 de Noviembre de 2016

Fdo: _____

Resumen

Los primeros modelos energéticos se desarrollan a comienzos del siglo XX. Estos, que consideraban el sistema poco alterable, se empleaban como herramientas de predicción que se focalizaban en el uso final de la energía y los precios del consumidor.

A partir de la década de los 70, debido a la crisis energética y a la creciente concienciación medioambiental, se cambia la tendencia estacionaria y surgen nuevos modelos energéticos, enfocados a una mayor preocupación de la economía del sector energético y a una mayor concienciación de las repercusiones de este sector en el medioambiente.

Sin embargo, casi medio siglo después los modelos siguen la misma tendencia, enfocados principalmente en las repercusiones económicas y en determinados casos también medioambientales mediante el análisis de las emisiones de GEI. Sin embargo, en este periodo de grandes desarrollos económicos y tecnológicos, no solo la economía, si no la sociedad y los retos medioambientales han cambiado: la medida del desarrollo económico real es mas compleja que la medida del PIB, hay una mayor concienciación hacia los problemas sociales y existen retos medioambientales que se suman a la lucha contra el cambio climático. Es por ello que se requiere de nuevos modelos que se adapten al nuevo periodo que esta viviendo la humanidad.

El objetivo que se persigue en el presente trabajo fin de master es desarrollar las bases de un nuevo modelo dinámico que incluya nuevas variables y relaciones adaptadas a los retos que se presenta el sistema energético actual. Para ello se realiza un análisis de cinco modelos tradicionales: LEAPS, TIMES, PRIMES, WoLiM y RETScreen, introduciendo estos modelos, realizando una clasificación de sus principales características, desarrollando su estructura y su interfaz de usuario, examinando un ejemplo de uso y realizando un inventario de las variables que emplea cada modelo.

Tras el análisis de los cinco modelos, se realiza una critica identificando sus carencias en cuatro factores interrelacionados: los factores económico, tecnológico, medioambiental y social.

Tras la critica realizada a los modelos tradicionales, se introducen las bases de un nuevo modelo energético que satisfaga los factores previamente analizados. Para ello se sigue la misma estructura empleada en el análisis de los modelos (a excepción de la interfaz de usuario y ejemplo de uso) y se introducen y desarrollan nuevas variables que completen el modelo.

Índice

Abstract	1
Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
1. Introducción	7
1.1. Introducción a los modelos	7
1.2. Historia del modelado energético	8
1.3. Características generales de los modelos energéticos	10
2. Principales modelos energéticos	16
2.1. LEAP	16
2.1.1. Introducción	16
2.1.2. Clasificación	17
2.1.3. Estructura	18
2.1.4. Interfaz de usuario	19
2.1.5. Ejemplo de uso	20
2.1.6. Análisis de variables	21
2.2. TIMES	23
2.2.1. Introducción	23
2.2.2. Clasificación	23
2.2.3. Estructura	24
2.2.4. Interfaz de usuario	26
2.2.5. Ejemplo de uso	26
2.2.6. Análisis de variables	28
2.3. PRIMES	30
2.3.1. Introducción	30
2.3.2. Clasificación	30
2.3.3. Estructura	30
2.3.4. Interfaz de usuario	32
2.3.5. Ejemplo de uso	32
2.3.6. Análisis de variables	33
2.4. WoLiM	35
2.4.1. Introducción	35
2.4.2. Clasificación	35
2.4.3. Estructura	35
2.4.4. Interfaz de usuario	37
2.4.5. Ejemplo de uso	37
2.4.6. Análisis de variables	38
2.5. RETScreen	41
2.5.1. Introducción	41
2.5.2. Clasificación	41
2.5.3. Estructura	41
2.5.4. Interfaz de usuario	43
2.5.5. Ejemplo de uso	45

2.5.6. Análisis de variables	46
2.6. Crítica a los modelos dinámicos tradicionales	48
3. Propuesta de un nuevo modelo energético	50
3.1. Introducción	50
3.2. Clasificación	51
3.3. Estructura	51
3.4. Análisis de variables	61
3.5. Análisis de nuevas variables	67
3.5.1. Variables que limitan el uso de recursos	67
3.5.2. Intensidad de materiales	72
3.5.3. Pobreza energética y grado de limitación de la pobreza energética	75
3.5.4. Índice de riqueza inclusiva o PIB verde	77
3.5.5. Índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad	78
3.5.6. Precio máximo de la electricidad	79
3.5.7. Cuota mínima de energías renovables	80
3.5.8. Cuota máxima de energía nuclear	81
3.5.9. Límite de emisiones	82
3.5.10. Superficie forestal y cuota mínima de superficie forestal	83
3.5.11. Recursos hídricos e intensidad de agua de cada tecnología energética	84
3.5.12. Resumen de las variables aportadas por el modelo	86
Conclusiones	88
Referencias	91

Índice de figuras

1.	Estructura básica del modelo LEAPS	8
2.	Características de los modelo top-down t bottom-up	12
3.	Vista principal de la pantalla de inicio de LEAP	20
4.	Esquema del procedimiento analítico de LEAP	21
5.	Esquema del RES del modelo TIMES	25
6.	Esquema del modelo TIMES	26
7.	Ejemplo de TIMES con sistema aislado	27
8.	Ejemplo de TIMES con interconexión	27
9.	Ejemplo de TIMES, costes con el sistema cerrado	28
10.	Estructura básica del modelo PRIMES	32
11.	Comparación de la demanda energética mediante PRIMES	33
12.	Lógica de funcionamiento básico del modelo WoLiM	36
13.	Diagrama causal del modelo WoLiM	37
14.	Captura de la pantalla de inicio de WoLiM	38
15.	Hipótesis y políticas empleadas en el modelo WoLiM	40
16.	Resultados del estudio de escenarios mediante WoLiM	40
17.	Etapas del proceso de análisis de RETScreen	43
18.	Primera hoja de calculo del modelo RETScreen.	43
19.	Primer apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen	44
20.	Segundo apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen	44
21.	Tercer apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen	45
22.	Cuarto apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen	45
23.	Ultimo apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen	45
24.	Flujo de caja acumulado para el tercer escenario analizado	46
25.	Relaciones principales entre los módulos del modelo	51
26.	Relaciones principales entre las variables del modulo escenario base	55
27.	Relaciones principales entre las variables del modulo demanda	57
28.	Relaciones principales entre las variables del modulo suministro de energía	57
29.	Relaciones principales entre las variables del modulo transporte	58
30.	Relaciones principales entre las variables del modulo recursos	59
31.	Relaciones principales entre las variables del sistema eléctrico	60
32.	Uso de materiales por tipo, durante el periodo 1900-2005	68
33.	Disminución de la calidad de extracción de oro	69
34.	Intensidad energética en la extracción de oro respecto de su calidad	70
35.	Curvas de Hubbert para el cobre y aluminio	70
36.	Cuenta atrás exergética de los materiales más consumidos	72
37.	Grado de criticidad y uso de elementos	73
38.	Evaluación de elementos críticos empleados en energía fotovoltaica	73
39.	Demanda actual y futura en células fotovoltaicas	73
40.	Análisis producción-demanda de litio para vehículos de pasajeros	74
41.	Consumo total de energía primaria por regiones en un escenario de crecimiento económico bajo	74
42.	Cuota de pobreza energética en España según el método 2M	76
43.	Principales iniciativas de medida de la pobreza energética y sus funcionalidades	76
44.	Representación del IDH-D	78
45.	Secuencia de cálculos del IDH-D para el Líbano	79

46.	Consumo de energía primaria en España	81
47.	Emisiones mundiales de CO2 en el periodo 1960-2013	82
48.	Tendencia de la superficie forestal en el periodo 1990-2015	83
49.	Vulnerabilidad de escasez de agua por países	84
50.	Consumo de agua para refrigeración	86

Índice de tablas

1.	Clasificación modelo LEAP	18
2.	Variables contenidas en el modelo LEAP	22
3.	Clasificación modelo TIMES	24
4.	Variables contenidas en el modelo TIMES	29
5.	Clasificación modelo PRIMES	31
6.	Variables contenidas en el modelo PRIMES	34
7.	Clasificación modelo WoLiM	36
8.	Variables contenidas en el modelo WoLiM	39
9.	Clasificación modelo RETScreen	42
10.	Variables contenidas en el modelo RETScreen	47
11.	Crítica a los modelos dinámicos tradicionales	49
12.	Clasificación del modelo propuesto	51
13.	Variables contenidas en el módulo escenario base	61
14.	Variables contenidas en el módulo demanda	63
15.	Variables contenidas en el módulo suministro de energía	64
16.	Variables contenidas en el módulo transporte	65
17.	Variables contenidas en el módulo recursos	66
18.	Resumen de las variables introducidas por el modelo	87
19.	Resumen de las conclusiones	89

1. Introducción

En este primer bloque del trabajo, se va a introducir el significado de modelo matemático, se va a ampliar esta descripción a los modelos energéticos, se detallarán sus antecedentes históricos y se hará una descripción de las características generales de los modelos energéticos.

1.1. Introducción a los modelos

Un modelo matemático es un sistema en el que todas las opciones y comportamientos se pueden simular por medio de ecuaciones matemáticas, cuyas variables se establecen previamente en función del propósito del modelo. Su objetivo es la obtención de resultados en base a experiencias anteriores y al uso de la estadística. Cabe resaltar que todo modelo matemático sufre un error cuando se compara con la realidad, debido a factores externos y a que es una aproximación con un determinado grado de exactitud [Lopez \(2013\)](#).

Se pueden realizar diversas clasificaciones de los modelos, atendiendo a:

- La información de entrada: Se distingue entre modelo heurístico, que se apoya en las definiciones de las causas o los mecanismos naturales que originan el fenómeno en cuestión, y modelo empírico, enfocado en el estudio de los resultados de la experimentación.
- El tipo de representación:
Los modelos cualitativos, que no buscan un resultado de tipo exacto, y los modelos cuantitativos, que, por el contrario, necesitan dar con un número preciso, para lo cual se apoyan en fórmulas matemáticas de variada complejidad.
- La aleatoriedad de la situación inicial:
Modelos estocásticos, que devuelven la probabilidad de que se obtenga un cierto resultado y no el valor en sí, y modelos deterministas, cuando los datos y los resultados se conocen, por lo que no existe incertidumbre.
- El objetivo del modelo:
Modelo de simulación, que intenta adelantarse a un resultado en una determinada situación, sea que ésta se pueda medir en forma precisa o aleatoria. Modelo de control, a través del cual se pueden determinar los ajustes necesarios para obtener un resultado particular. Modelo de optimización, que contempla distintos casos y condiciones, alternando valores, para encontrar la configuración más satisfactoria.

La aplicación de modelos matemáticos al campo de la energía deriva en los modelos energéticos, empleados para determinar como se satisfarán las necesidades energéticas, seleccionando las fuentes energéticas que se emplearán en un determinado periodo, su evolución, así como los usos de la energía, [Álvarez Watkins \(2004\)](#).

A modo de ejemplo, en la figura 1 se presenta un diagrama con la estructura básica del modelo LEAPS, sus principales variables y sus relaciones, extraído del texto [di Sbroiavacca \(2013\)](#).

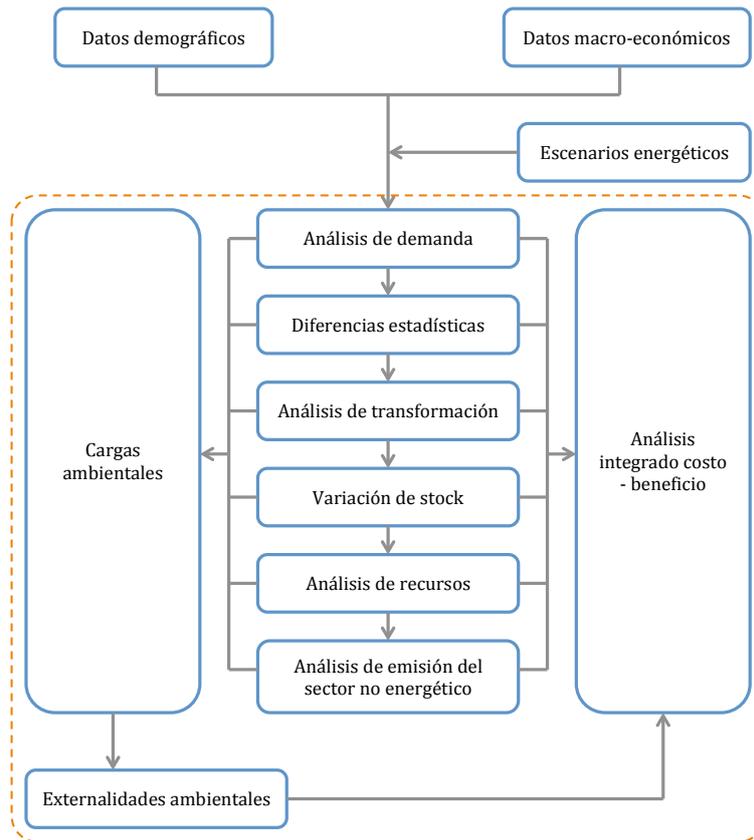


Figura 1: Estructura básica del modelo LEAPS

Dentro de los modelos energéticos, se define el escenario energético como la ordenación que el sector energético tiene en un momento puntual. La estrategia energética son los pasos a seguir para alcanzar un determinado escenario energético, [Álvarez Watkins \(2004\)](#).

1.2. Historia del modelado energético

Los primeros modelos energéticos se realizaron a comienzos del siglo XX. Eran modelos con una marcada tendencia económica, que consideraban el sistema energético como un sistema poco alterable, y por tanto, de fácil predicción, en los que se trataba la tecnología como cajas negras. Estos modelos eran herramientas de previsión directas y lineales, que se focalizaban en el uso final de la energía y los precios del consumidor sin importar la salud humana o el medio ambiente.

Esta situación cambia en la década de los 70: debido a la crisis energética y al surgimiento de un movimiento de concienciación medioambiental, se comienza el abandono de la visión estacionaria que se tiene del mundo. Por un lado, se tiene una mayor concienciación de las repercusiones que tiene en el medio ambiente el empleo desmedido de los recursos y la energía. Por el otro, la crisis energética trajo una renovada preocupación en la economía del sector energético que cambió radicalmente la perspectiva hacia el manejo de los recursos. Esto derivó en la creación de 2 tendencias de modelado, una ambiental y otra enfocada en el mercado.

En 1971 Forrester, perteneciente al System Dynamics Laboratory del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y bajo encargo del club de Roma, (organización no gubernamental fundada en 1968 y que agrupa a científicos, políticos, empresarios y demás personas interesadas en mejorar el mundo desde un enfoque multidisciplinar) publica el modelo World-2, que trataba de definir y prever la realidad mundial a través de un modelo capaz de ser tratado por computadoras, basándose en un sistema de 45 ecuaciones básicas relacionando seis sectores fundamentales:

- Población.
- Inversión de capital.
- Espacio geográfico.
- Recursos naturales.
- Contaminación.
- Producción de alimentos.

Siguiendo la misma metodología, el grupo del MIT desarrolla World-3, ampliado a 77 ecuaciones básicas que relacionan cinco variables fundamentales:

- Población.
- Producción agrícola.
- Recursos naturales.
- Producción industrial.
- Contaminación.

En World-3 se constataba la tendencia del mundo que llevaba inevitablemente a un colapso que debería producirse antes de cien años, provocado principalmente por el agotamiento de los recursos naturales. Estos trabajos fueron recogidos por el Club de Roma en su informe de 1972 “Los límites al crecimiento”.

Pese a la sencillez aparente y las simplificaciones de estos sistemas, marcaron el comienzo de lo que hoy se conoce como modelos energéticos.

En 1979 la ONU desarrolla el Modelo de Relaciones Internacionales en Agricultura MOIRA (Model Of International Relations in Agriculture), para modelar mundialmente el uso del suelo y la agricultura.

En 1980 se desarrolla el modelo de Simulación e Información de la Contaminación Atmosférica Regional RAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation), cuyo objetivo era representar los efectos de la acidificación de la lluvia.

En este periodo se desarrollan también modelos enfocados en el mercado, como el Modelo de Asignación de Mercado MARKAL (MARKet Allocation model), desarrollado en 1978 en

un esfuerzo conjunto por el Brookhaven National Laboratory (BNL) de los Estados Unidos y la Kernforschungsanlage Julich (KFA) de Alemania, para el Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Su objetivo era evaluar la función a largo plazo de las nuevas tecnologías en los sistemas energéticos de los 17 países miembros de la AIE, identificando las futuras rentabilidades entre las opciones tecnológicas. Ambas tendencias de modelado continuaron en paralelo y los modelos se hacían cada vez más complejos. A finales de la década de los ochenta los modelos ambientales se dedicaron a representar las interrogantes del cambio climático.

Durante los últimos 20 años se han ido desarrollando los modelos híbridos, que conjugan las cuestiones tecnológicas propias del sector energético, las cuestiones medioambientales y el modelado tradicional basado en la teoría económica clásica.

1.3. Características generales de los modelos energéticos

No es sencilla la realización de una clasificación de los modelos, dada la gran variedad actual, de manera que se va a recurrir en este trabajo a la clasificación hecha en [Beeck \(1999\)](#), que reúne las clasificaciones hechas por otros autores como Vogely, Meier o Grubb. De acuerdo a esta autora, se pueden diferenciar entre:

- **Objetivo general y específico**

- General:

- Para predecir el futuro: se basa en la extrapolación de datos históricos para predecir lo que pueda suceder en el futuro.
- Para explorar el futuro (análisis de escenarios): compara diversos escenarios en los cuales se hacen suposiciones del comportamiento económico, las necesidades de recursos, el progreso técnico, etc.
- Retrospección (o mirar hacia atrás desde el futuro): construye visiones de un futuro deseado para posteriormente analizar que se debe cambiar para alcanzar ese estado futuro

- Específico

- Modelos de demanda de energía: Se centra en un sector de la economía y lo relaciona con la demanda en función de cambios en la población, ingresos y precios de la energía.
- Modelos de suministro de energía: se centran principalmente en los aspectos técnicos relativos a los sistemas de energía y si la oferta puede satisfacer una demanda dada. Pueden incluir aspectos financieros utilizando un enfoque de mínimo coste.
- Modelos de impacto: Los impactos pueden ser causados por el uso de ciertos sistemas de energía o por el uso de determinadas medidas políticas. Los impactos pueden incluir cambios en la situación financiera y/o económica, cambios en la situación social, cambios en la salud y el medio ambiente. Estos modelos evalúan las consecuencias de la selección de ciertas opciones.

- Modelos de evaluación: Es la comparación y evaluación de distintas alternativas con el fin de seleccionar la más adecuada. Las consecuencias o impactos de cada opción son comparados y evaluados de acuerdo a uno o más criterios preestablecidos de los cuales la eficiencia es el más empleado.

Aunque existen modelos que se centran en un solo aspecto, los modelos más recientes tienen en general un enfoque integrado en el que combinan varios propósitos específicos.

■ Estructura del modelo

Además de por el propósito, los modelos también pueden distinguirse en función de su estructura. En la caracterización de la estructura de un modelo se busca analizar dos aspectos: el tipo de presunciones o conjeturas y los parámetros que conforman el modelo. De acuerdo a esto se puede hacer un análisis de cuatro factores en cuanto a las conjeturas o presunciones:

- Grado de endogenización: la cantidad de parámetros y/o conjeturas que se determinan por el usuario o bien son estimadas por el propio modelo. En un modelo altamente endógeno se minimizan los parámetros o variables externas, y se basa en sus conjeturas internas para determinar el comportamiento del sistema.
- La extensión de la descripción de los componentes del sector no energético de la economía: incluyen la inversión, el comercio, el consumo de bienes no energéticos y servicios, la distribución de ingresos, etc.
- La extensión de la descripción de los usos finales de energía.
- La extensión de la descripción de las tecnologías de suministro de energía: La mayoría de los modelos con una tendencia más económica representan las fuentes energéticas como una caja negra. Si el modelo permite una descripción más detallada de las tecnologías de suministro se pueden analizar mejor cuestiones como la sustitución de combustibles.

En cuanto a los parámetros empleados, actualmente los modelos energéticos cuentan con infinidad de parámetros. Entre los más usuales se pueden destacar: el crecimiento de la población, el crecimiento económico, la demanda energética, el coste de la energía y las características económicas del sistema analizado, como pueden ser impuestos, subsidios, etc.

Si todos los parámetros de un modelo se han determinado de manera exógena, el modelo no sería más que un dispositivo de cálculo. Por otro lado, siempre debe haber al menos un parámetro externo. En la práctica, los modelos energéticos se distribuyen entre estos dos extremos.

■ Enfoque analítico

Se refiere a la forma o perspectiva en la que se abordará el estudio de determinado sistema real. En la actualidad hay dos tendencias para el tratamiento analítico de un modelo energético: top-down (o de arriba hacia abajo) y bottom-up (o de abajo hacia arriba). La distinción de ambos modelos es particularmente interesante ya que tienden a producir resultados opuestos para el mismo problema, debido a las distintas maneras en que estos dos tipos de modelos tratan la adopción de las tecnologías, el comportamiento de toma de decisiones de los agentes económicos, y cómo operan los mercados y las instituciones económicas durante un período determinado de tiempo.

- **Top-down:** La entrada son los indicadores económicos generales, la información macroeconómica y a partir de esto se estima la demanda primaria, la demanda sectorial y los procesos intermedios. Este tratamiento considera las tecnologías energéticas como cajas negras. Se definen las mejores opciones de tecnología por la optimización de algún parámetro económico dentro de un mercado perfecto, como el precio final de la energía. Son métodos habitualmente empleados para predicciones a corto plazo o el análisis de sectores específicos.
- **Bottom-up:** se analiza el uso final de la energía, la demanda final sectorial, y en función de ello el modelo estima la demanda primaria. No toma en cuenta las características sintetizadas de la tecnología dentro de un mercado sino los costos directos del uso de dicha tecnología. Habitualmente se calculan los costes de la energía por sectores, los costes de operación y mantenimiento, los costes de equipos, etc. y así todos los costos del proceso hasta llegar al coste final del uso de dicha tecnología para ese escenario en concreto. Estos métodos suelen usarse para determinar sistemas que estén muy bien definidos a largo plazo y en los que se estima que no existen importantes correlaciones entre el sistema energético y otros sistemas económicos.

El enfoque top-down se asocia con el paradigma económico "pesimista", mientras que el enfoque bottom-up se asocia con el paradigma de la ingeniería optimista. Por lo tanto, este último también se conoce como el enfoque de ingeniería.

En la figura 2 se muestran las características principales de los modelos top-down y bottom-up.

Top-Down Models	Bottom-Up Models
use an "economic approach"	use an "engineering approach"
give pessimistic estimates on "best" performance	give optimistic estimates on "best" performance
can not explicitly represent technologies	allow for detailed description of technologies
reflect available technologies adopted by the market	reflect technical potential
the "most efficient" technologies are given by the production frontier (which is set by market behavior)	efficient technologies can lie beyond the economic production frontier suggested by market behavior
use aggregated data for predicting purposes	use disaggregated data for exploring purposes
are based on observed market behavior	are independent of observed market behavior
disregard the technically most efficient technologies available, thus underestimate potential for efficiency improvements	disregard market thresholds (hidden costs and other constraints), thus overestimate the potential for efficiency improvements
determine energy demand through aggregate economic indices (GNP, price elasticities), but vary in addressing energy supply	represent supply technologies in detail using disaggregated data, but vary in addressing energy consumption
endogenize behavioral relationships	assess costs of technological options directly
assumes there are no discontinuities in historical trends	assumes interactions between energy sector and other sectors is negligible

Figura 2: Características de los modelo top-down t bottom-up

■ Metodología básica

Las metodologías utilizadas para el desarrollo concreto de los modelos energéticos. Es la forma en que se lleva a cabo el estudio en sí. Se aplica uno u otro según el tipo de resultados que se quiera obtener y según los datos de los que se parta:

- Modelos econométricos: en estos modelos se aplican técnicas estadísticas para estimar los valores futuros de los parámetros que representan el sistema que se estudia. El propósito de los modelos econométricos es predecir el futuro con la mayor precisión posible, utilizando los parámetros medidos. Una desventaja de esta metodología es que no tiene un conjunto representativo de opciones tecnológicas. También, puesto que las variables se basan en el comportamiento pasado, se requiere una estabilidad razonable del comportamiento económico.
- Modelos macroeconómicos: se centra en la idea de construir un modelo que represente el sistema económico y todos los sectores que se interrelacionen con dicho sistema. Tampoco suelen representar específicamente a la tecnología involucrada en el sector. Algunos de estos métodos cuentan con tablas de entradas- salidas para caracterizar los equipos que se encuentran ya disponibles en el mercado, pero casi nunca sobre posibles equipos futuros. Por lo tanto, algunos autores no consideran los modelos macroeconómicos como modelos de energía. Este modelo, pese a estar planteado para predecir valores futuros, supone que la estructura básica del sistema económico y sus interrelaciones con el sub-sector energético se mantienen constantes en el tiempo. Se utilizan para elaborar predicciones a corto y mediano plazo.
- Modelos de equilibrio económico: también conocidos como modelos de asignación de recursos. Donde los métodos econométricos y macroeconómicos se aplican principalmente para estudiar los efectos a corto o medio plazo, las metodologías de equilibrio económico se centran en el medio y largo plazo. Representan el sistema económico completo, dentro del cual se encuentra el subsector energético, aunque se centran más en éste último. Se utilizan para estudiar el sector de la energía como parte de la economía global y centrarse en las interrelaciones entre el sector energético y el resto de la economía. Hay dos tendencias en este modelo: una es la del equilibrio parcial, que no busca el equilibrio general de todo el sistema económico, sino el de ciertos sectores de interés, y la tendencia del equilibrio general o crecimiento óptimo en el que se busca el equilibrio de todo el sistema económico considerado.
- Modelos de optimización: se utilizan para optimizar las decisiones de inversión de energía, donde los resultados están determinados directamente por la entrada (alto grado de endogenización) bajo criterios de coste mínimo satisfaciendo las restricciones dadas. Empleados para periodos de tiempo que van del corto al largo plazo, utilizan análisis matemáticos complejos y programación lineal.
- Modelos de simulación: son modelos descriptivos basados en la representación lógica de un sistema y destinados a la producción de una operación simplificada de este sistema. Puede ser una representación estática de la operación del sistema en el estado actual, con el objeto de estudiar la respuesta del sistema a perturbaciones concretas, que se dan o no en un periodo de tiempo y que no afectan al siguiente periodo en la predicción; o bien puede ser una representación dinámica si el resultado de dicha perturbación afecta las condiciones del siguiente periodo temporal en la predicción. Los modelos de simulación son especialmente útiles en los casos en los que es imposible o

extremadamente costoso para hacer experimentos en el propio sistema. Una desventaja es que los modelos de simulación tienden a ser bastante complejos. A menudo se utilizan en el análisis de escenarios.

- Modelos de hojas de cálculo: es un modelo muy flexible que funciona como un paquete de software que permite al usuario crear un sistema a analizar y el tipo de estructura que conformará el modelo, y puede o no estructurarse como los otros tipos de modelos.
- Modelos retrospectivos: se utiliza para construir visiones de futuros deseados mediante entrevistas a expertos en el campo y marcan aquellos factores que deben cambiar bajo el sistema actual para alcanzarlo. El modelo computacional se encargaría entonces de corroborar la factibilidad del cambio en el escenario previsto. Este enfoque se utiliza a menudo en los estudios de energía alternativas.
- Modelos multicriterio: Esta metodología se utiliza para la inclusión de otros criterios además del económico. Permite incluir datos tanto cuantitativos como cualitativos en el análisis. Este enfoque todavía no se aplica ampliamente en modelos energéticos.
- **Enfoque matemático**

Otra clasificación se puede hacer en función del enfoque o procedimientos aplicados en los modelos matemáticos:

- Programación lineal: es una técnica práctica para encontrar la disposición de las actividades que maximiza o minimiza un criterio definido, con sujeción a las limitaciones operativas. Todas las relaciones se expresan en términos linealizados. La técnica se puede tratar solamente con situaciones en las que las actividades se pueden expresar en forma de igualdades o desigualdades lineales, y donde el criterio también es lineal. Es una técnica relativamente simple que da resultados rápidos y exige poco conocimiento matemático del usuario.
- Programación integrada mixta: es una extensión de la programación lineal, que permite un mayor detalle en la formulación de propiedades técnicas y las relaciones en los sistemas.
- Programación dinámica: es un modelo empleado para encontrar un camino de crecimiento óptimo. La solución del problema original se obtiene dividiendo el problema en subproblemas más pequeños para los que se calculan soluciones óptimas. En consecuencia, el problema original se resuelve de forma óptima utilizando las soluciones óptimas de los subproblemas.
- **Cobertura geográfica**

Referido a clasificar los modelos de acuerdo con la cobertura geográfica máxima que pretende representar y el nivel en el que el análisis se lleva a cabo. Los modelos globales describen el sistema mundial, el nivel regional se refiere con frecuencia a regiones internacionales (como Europa, Oceanía, aunque también se utiliza el término regional en algunos casos para referirse a regiones dentro de un país). Los modelos nacionales tratan condiciones del mercado mundial como un factor exógeno, pero abarcan todos los sectores importantes dentro de un país al mismo tiempo, realizando interrelaciones entre los sectores. El nivel de proyecto es un caso especial, que se refiere a un nivel sub-nacional. Sin embargo, el nivel de proyecto también puede abarcar un proyecto en una escala nacional o incluso internacional.

- **Cobertura sectorial**

Similar al punto anterior, un modelo se puede centrar en un solo sector o incluir más sectores socio económicos. Es crucial para el análisis definir estos sectores de cara a la recolección de datos y el análisis de resultados. Casi en la totalidad de los modelos existentes, los sectores utilizados no son los sectores determinados por el sistema energético, sino que se representan los sectores económicos.

- **Horizonte temporal**

Es una clasificación muy subjetiva, ya que en función de las características del modelo se considera corto o largo un periodo de tiempo característico. No existe una definición estándar de corto, mediano y largo plazo, sin embargo, generalmente un periodo de 5 años o menos se clasifica como corto plazo, entre 3 y 15 años corresponde al medio plazo, y de 10 años o más en el largo plazo. El horizonte de tiempo es importante porque los procesos económicos, sociales y ambientales difieren según la escala de tiempo empleada. La escala de tiempo determina la estructura y los objetivos de los modelos energéticos.

- **Requerimiento de datos**

En función del tipo de requerimiento de datos (monetarios, agregados, etc.).

2. Principales modelos energéticos

A continuación se van a describir los modelos energéticos más relevantes. Dado que existe una gran cantidad de modelos energéticos, de cara a evitar la subjetividad en su selección, se han escogido aquellos que tienen una mayor relevancia internacional (por emplearlo organismos internacionales, por figurar en una mayor cantidad de trabajos, etc.), además de una correcta adecuación a los objetivos del trabajo. Los modelos seleccionados son:

- LEAP
- TIMES.
- PRIMES.
- WOLIM.
- RETSCREEN.

Con vistas a analizar los modelos dinámicos propuestos, se sigue para todos la misma estructura:

- Introducción: en la que se hace una breve introducción histórica, se analiza someramente las principales características y se enumeran algunos ejemplos de uso del modelo estudiado en algunos informes o estudios de relevancia.
- Clasificación: se sigue la descrita anteriormente en [Beeck \(1999\)](#), con vistas a seguir una estructura de clasificación homogénea.
- Estructura: en este apartado se analiza que estructura siguen los modelos analizados y sus particularidades.
- Interfaz de usuario: se desarrolla el aspecto visual y de funcionamiento de cada modelo.
- Ejemplo de uso: se emplea un estudio o un artículo para ejemplificar como, a través del uso del modelo analizado, se llega a unos resultados que satisfacen el objetivo del artículo o estudio.
- Análisis de variables: se enumeran las distintas variables que maneja el modelo para su análisis, una breve descripción y las unidades en las que se expresa.
- Crítica de los modelos dinámicos tradicionales: en este apartado, con la información recopilada del desarrollo de los apartados anteriores, se realiza una crítica de los modelos en base a cuatro factores: económicos, tecnológicos, medioambientales y sociales.

2.1. LEAP

2.1.1. Introducción

El Sistema de Planificación de Alternativas Energéticas de Largo Plazo (LEAP, Long-range Energy Alternatives Planning System), es un modelo energético de enfoque bottom-up desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI-US) con el apoyo del Programa de las

Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Su primera versión se desarrolló en 1980 y a finales de 1990 se actualizó y migró de DOS a Windows. LEAP es una herramienta útil para modelar escenarios energéticos y ambientales. Sus escenarios se basan en balances integrales sobre la forma en que se consume, convierte y produce energía en una región o economía determinada, según una serie de hipótesis. Dada su flexible estructura de datos, LEAP permite realizar análisis tan profundos en especificaciones tecnológicas y detalles de consumo final como lo decida el usuario.

Se puede utilizar LEAP para realizar tareas diversas: como base de datos, constituye un completo sistema que permite conservar información energética; como herramienta para realizar proyecciones, permite al usuario proyectar ofertas y demandas de energía a lo largo de un período de planificación de largo plazo; como herramienta de análisis de políticas, simula y evalúa los efectos (tanto físicos como económicos y ambientales) de programas, inversiones y acciones energéticas alternativas.

LEAP ha sido adoptado por miles de organizaciones en más de 190 países en todo el mundo. Sus usuarios incluyen agencias gubernamentales, centros académicos, organizaciones no gubernamentales, empresas de consultoría y servicios públicos de energía. Se ha utilizado en una gran variedad de escalas, que van desde ciudades y comunidades a los análisis nacionales, regionales y globales. Además de importantes trabajos como:

En China, el departamento de ciencias medioambientales e ingeniería de la Universidad de Tsinghua, analizó la reducción potencial de CO₂ del sector eléctrico de este país [Cai y cols. \(2007\)](#).

En los Estados Unidos, una destacada organización no gubernamental, el Consejo de Defensa de Recursos Naturales (NRDC) utiliza LEAP para analizar las normas nacionales sobre la economía de los combustibles y promover políticas que estimulen los vehículos y combustibles limpios, [SEI \(2016\)](#).

En Pakistán, el departamento de ciencias medioambientales de la Universidad Fatima Jinnah, utilizó LEAP para monitorizar la contaminación por el transporte urbano y la demanda de energía en Rawalpindi e Islamabad [Shabbir y Ahmad \(2010\)](#).

En México, el Centro de Investigación en Energía, de la Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM), hizo un estudio prospectivo sobre el uso de la bioenergía en México [Islas y cols. \(2007\)](#).

2.1.2. Clasificación

De acuerdo a la clasificación de las características generales expuestas anteriormente, podemos clasificar el modelo LEAP, tabla 1.

Propósito	General: explorar y previsión. Específico: analizar la oferta, demanda e impactos ambientales. El objetivo incluye el análisis de la política energética y de la política ambiental, la evaluación de la biomasa y el uso del suelo, el análisis de proyectos de pre-inversión, la planificación integrada de energía y el análisis de ciclos de combustible.
Estructura	Grado alto de endogenización y descripción de todos los sectores de la economía para definir la demanda. Descripción simple de los usos finales y del suministro de energía, incluyendo fuentes renovables.
Tratamiento analítico	Tratamiento híbrido, (análisis de demanda arriba-abajo, suministro abajo-arriba).
Metodología básica	La demanda sigue una metodología econométrica o macroeconómica. El suministro una metodología de simulación.
Enfoque matemático	No disponible.
Alcance geográfico	Local, nacional, regional y global.
Cobertura sectorial	Todos los sectores, (incluyendo transporte, doméstico, servicios, industrial y agricultura).
Horizonte temporal	Medio-largo plazo, en plazos anuales.
Requerimiento de datos	Cuantitativos, monetarios, agregados y desagregados (pocos requisitos de datos debido a la falta de optimización).

Tabla 1: Clasificación modelo LEAP

2.1.3. Estructura

En cuanto a la estructura interna de LEAP, el programa se constituye en varios módulos interrelacionados:

- **Parámetros básicos**

En este módulo se definen las variables básicas que compondrán el modelo energético, como la población, el producto interior bruto o la tasa de crecimiento.

- **Escenarios de energía**

Este módulo es la principal herramienta utilizada en LEAP para llevar a cabo un ejercicio de planificación energética de una determinada área geográfica. El programa asiste en la elaboración de balances energéticos, las proyecciones de la oferta y la demanda, además representa en los escenarios los efectos de los planes y acciones de las políticas energéticas.

- **Demanda**

En este módulo se desarrolla y calcula el consumo final de energía, de acuerdo a la definición de las variables que se hayan seleccionado. Se desglosa a su vez en cuatro grupos: residencial, industrial, comercial y transporte.

- **Transformación**

En base a la estimación de la demanda y a los recursos definidos, el módulo Transformación simula la conversión de energía primaria a final para ajustar oferta y demanda.

- **Recursos**

Consistente en un listado de recursos energéticos primarios y secundarios con los que satisfacer la demanda.

- **Resultados**

Herramienta empleada para comparar los impactos económicos (costos y beneficios), físicos (la energía y el uso de los recursos) y medio ambientales (emisiones) de los diferentes escenarios calculados.

- **Base de datos ambientales**

Llamada base de datos de tecnología y medio ambiente, TED (technology and environmental database), empleada para calcular las emisiones y contaminantes y los impactos ambientales. También se puede emplear aislada como una completa base de datos.

2.1.4. Interfaz de usuario

Para el desarrollo de las diferentes posibilidades de análisis que presenta LEAP, el modelo energético presenta una interfaz de usuario muy intuitiva que se estructura en ocho opciones desplegadas en el menú de “vistas”:

- **Análisis**

La Vista de Análisis es el lugar donde se crean las estructuras de datos, modelos e hipótesis en LEAP. Se desarrolla a través de un árbol con una estructura jerárquica empleado para crear y organizar estructuras de datos bajo cinco categorías principales: Variables Principales, Efectos, Demanda, Transformación y Recursos.

- **Resultados**

Muestra los resultados de todas las partes del sistema energético. Se puede utilizar para crear una gran variedad de gráficos y tablas que representen cada aspecto del sistema energético: demanda, transformación, recursos, costos y cargas ambientales. También permite ver informes para uno o más de los escenarios previstos.

- **Diagramas**

Representa un diagrama del sistema energético de referencia, en el que se muestra los principales flujos de energía en el sistema, desde la extracción del recurso, pasando por la conversión y transporte de las fuentes, hasta la demanda energética final.

- **Balance Energético**

Muestra los resultados de los cálculos del balance energético estándar. Se pueden ver balances energéticos para cualquier escenario calculado y cualquier año del análisis.

- **Resúmenes**

Es una herramienta con la cual se pueden crear informes personalizados en forma de tabla. Esta vista también se usa para acceder al informe resumido de costo-beneficio, que resume los costos y beneficios de los escenarios comparados con un escenario base elegido.

- **Vistas**

Herramienta empleada para agrupar gráficos “favoritos” creados con anterioridad en la vista de Resultados. Permite obtener una mirada general de diferentes aspectos del sistema energético, tales como costos, impactos ambientales y requerimientos de recursos.

■ Base de Datos de Tecnología y Medio Ambiente

Herramienta que proporciona principalmente una amplia información sobre las características técnicas, costos e impactos ambientales de una gran gama de tecnologías energéticas disponibles a nivel internacional y en determinadas regiones de países en vías de desarrollo. Se desarrolla en cuatro grupos: demanda de energía, conversión de energía, transmisión, distribución y almacenamiento y control de la contaminación. El núcleo de la base de datos de TED se puede editar y complementar con datos propios del usuario.

■ Notas

Herramienta simple de procesamiento de textos que permite incluir documentación y referencias para cada rama del árbol.

A continuación se muestra una captura de pantalla con la vista principal de LEAP, figura 3. A la izquierda se puede ver el menú de vistas que se ha descrito. Está seleccionada la opción análisis, en la que se puede ver el menú en forma de árbol empleado para introducir el valor de las variables, su relación entre ellas y su evolución temporal.

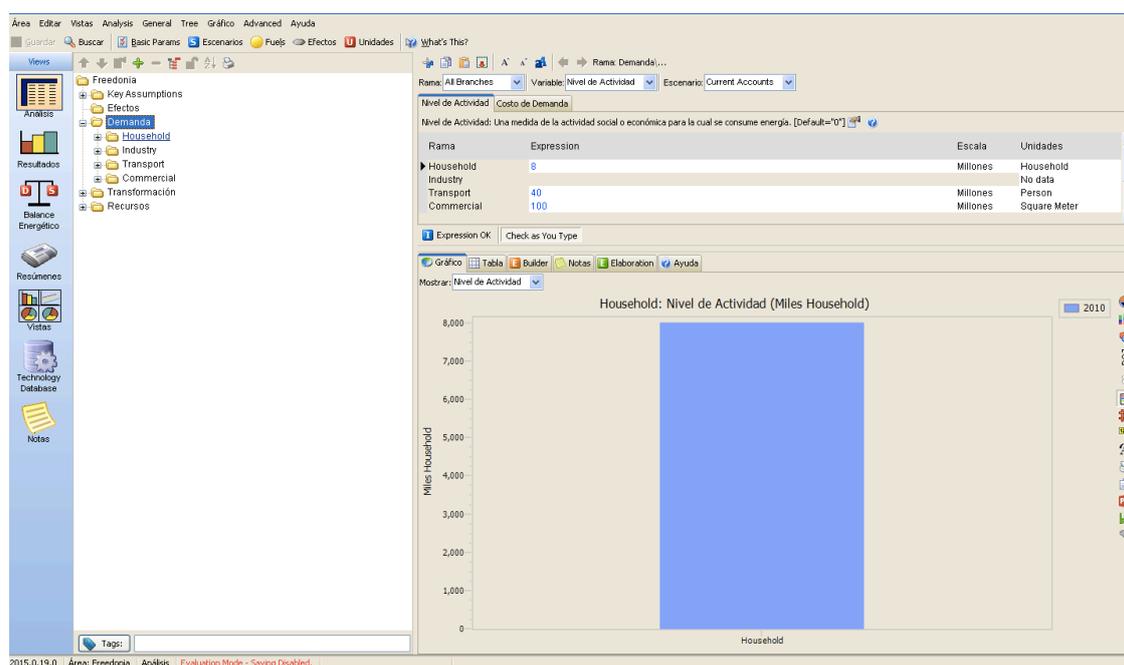


Figura 3: Vista principal de la pantalla de inicio de LEAP

2.1.5. Ejemplo de uso

Con el fin de comprender mejor el procedimiento analítico que sigue el modelo, se toma un ejemplo de un estudio realizado por el Instituto Internacional para el análisis de sistemas aplicados (IIASA) y por la Universidad de Estambul en Turquía, para estudiar el potencial de

ahorro energético y de emisiones de CO₂ en la industria del hierro y del acero en este país, empleando LEAP Ates (2015). Los pasos que sigue el modelo son:

1. Definición de escenarios de referencia y sus suposiciones. Se desarrollaron cuatro escenarios diferentes para su análisis.
2. Producción por sectores: se introdujo la cantidad de producto de cada uno de los productores durante un periodo de tiempo.
3. Misiones de CO₂: A partir del módulo Resultados, cada carga medioambiental se vinculó a una fuente de energía utilizada en los diferentes procesos.
4. Ahorro de energía y potencial de reducción de emisiones de CO₂: LEAP comparó los resultados de los diferentes análisis de escenarios y propuso el potencial de ahorro energético y el potencial de mitigación de CO₂ para cada uno de ellos. Los resultados agregados de los escenarios pueden ser vistos año a año en el período seleccionado o para todo el intervalo de tiempo.
5. Costes: En esta parte, se calculó el coste total del sector, incluyendo los costes de los equipos.

En la figura 4 se muestra un esquema del procedimiento analítico empleado en LEAP

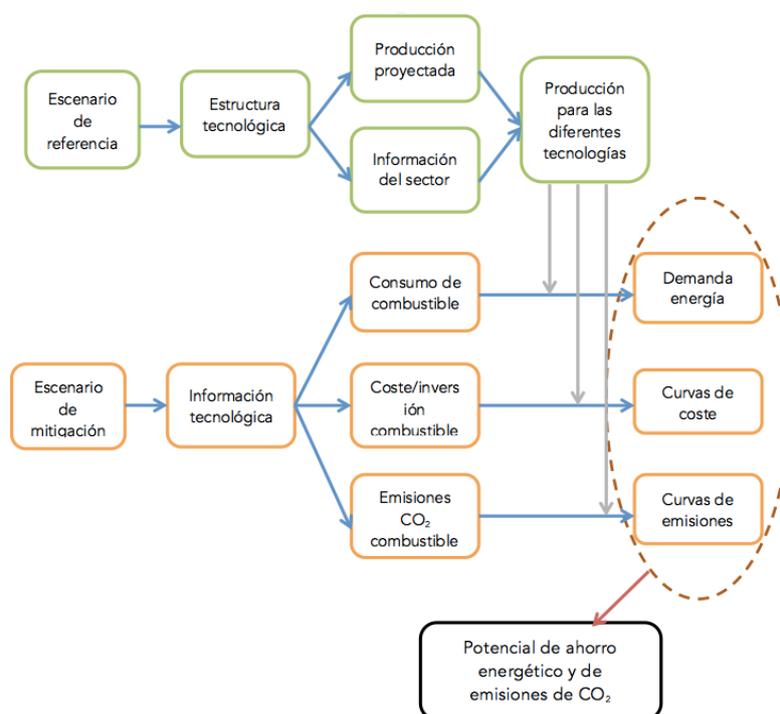


Figura 4: Esquema del procedimiento analítico de LEAP

2.1.6. Análisis de variables

En la tabla 2 se muestra un listado de las variables empleadas por LEAP para modelar los escenarios, los supuestos clave, la demanda de energía, así como su transformación y los recursos energéticos disponibles.

Variable	Descripción	Unidades
----------	-------------	----------

Producto Interior Bruto (PIB)	PIB	€
Población	Población	Habitantes
Consumo energético residencial	Consumo energético final en el sector residencial	mtoe o EJ
Consumo energético industrial	Consumo energético final en el sector industrial	mtoe o EJ
Consumo energético sector servicios	Consumo energético final en el sector servicios	mtoe o EJ
Consumo energético agricultura, pesca y ganadería	Consumo energético final en los sectores de agricultura, silvicultura y piscicultura	mtoe o EJ
Consumo energético sector transporte	Consumo energético final en el sector transportes	mtoe o EJ
Usos no energéticos	Usos no energéticos de combustibles	mtoe o EJ
Cuota de combustibles en el consumo energético residencial	Cuota de cada combustible o portador de energía consumido por el sector (gas, carbón, electricidad, etc.)	%
Cuota de combustibles en el consumo energético industrial	Cuota de cada combustible o portador de energía consumido por el sector (gas, carbón, electricidad, etc.)	%
Cuota de combustibles en el consumo energético del sector servicios	Cuota de cada combustible o portador de energía consumido por el sector (gas, carbón, electricidad, etc.)	%
Cuota de combustibles en el consumo energético de agricultura, pesca y ganadería	Cuota de cada combustible o portador de energía consumido por el sector (gas, carbón, electricidad, etc.)	%
Cuota de combustibles en el consumo energético del sector transportes	Cuota de cada combustible o portador de energía consumido por el sector (gas, carbón, electricidad, etc.)	%
Cuota de combustibles en usos no energéticos	Cuota de cada combustible consumido por el sector (gas, carbón, etc.)	%
Pérdidas de calor	Pérdidas de calor en la red de transporte y distribución	%
Pérdidas eléctricas	Pérdidas eléctricas en la red de transporte y distribución	%
Pérdidas de carbón	Pérdidas en el transporte de carbón	%
Pérdidas de gas	Pérdidas en el transporte y distribución de gas	%
Pérdidas de petróleo	Pérdidas en el transporte y distribución de petróleo	%
Necesidades propias de calor	Necesidades térmicas propias del sector energético, como % de la producción de calor	%
Necesidades propias de electricidad	Necesidades eléctricas propias del sector energético, como % de la electricidad generada	%
Necesidades propias de carbón	Necesidades de carbón propias del sector energético, como % del carbón producido e importado	%
Necesidades propias de gas	Necesidades de gas propias del sector energético, como % del gas producido e importado	%
Necesidades propias de petróleo	Necesidades de petróleo propias del sector energético, como % del petróleo producido e importado	%
Eficiencia de los procesos eléctricos	Eficiencia de cada proceso de generación eléctrica, (petróleo, carbón, gas, etc.)	%
Cuota de los procesos eléctricos	Cuota de cada proceso de generación eléctrica, (petróleo, gas, carbón, etc.)	%
Eficiencia de los procesos térmicos	Eficiencia de cada proceso de generación de calor, (petróleo, carbón, gas, etc.)	%
Cuota de los procesos térmicos	Cuota de cada proceso de generación de calor, (petróleo, gas, carbón, etc.)	%
Refino de petróleo/producción de biocombustibles/eficiencia de licuefacción	Eficiencia de cada proceso	%
Refino de petróleo/producción de biocomb./cuota de los procesos de licuefacción	Cuota de cada proceso	%
Costes de los dispositivos que consumen energía para cada sector de la demanda	Datos de coste, separado por sectores (residencial, industrial, etc.)	€
Costes de capital para cada proceso de generación eléctrica	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, eólica etc.)	€/MW
Costes fijos de O&M para cada proceso de generación eléctrica	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, eólica etc.)	€/MW
Costes variables de O&M para cada proceso de generación eléctrica	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, eólica etc.)	€/MWh
Costes de capital de cada proceso de producción de calor	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, etc.)	€/MW
Costes fijos de O&M para cada proceso de producción de calor	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, etc.)	€/MW
Costes variables de O&M para cada proceso de producción de calor	Datos de costes, separados para cada proceso (carbón, gas, etc.)	€/MWh

Tabla 2: Variables contenidas en el modelo LEAP

2.2. TIMES

2.2.1. Introducción

El modelo TIMES (acrónimo de The Integrated MARKAL-EFOM (MARKet ALlocation-Energy Flow Optimisation Model)System, el sistema integrado MARKAL-EFOM) desarrollado por la ETSAP bajo el auspicio de la IEA, es un generador de modelos de optimización para los sistemas energéticos locales, nacionales o globales, que proporciona una buena base de datos tecnológica para estimar la dinámica de la energía durante diferentes periodos temporales. Para ello, combina dos enfoques, el tecnológico y el económico. El modelo está compuesto por todos los pasos que transforman un recurso primario hasta un servicio energético demandado (transporte, distribución, conversión, etc.). Además de poder aplicarse al análisis de todo el sector energético, también puede aplicarse para estudiar en detalle sectores individuales (por ejemplo, el sector de la electricidad o la calefacción urbana).

Para el funcionamiento del modelo, el usuario proporciona estimaciones del uso final de la energía para cada región, define escenarios y limitaciones. Además, también realiza estimaciones de las existencias de equipos relacionados con la energía en todos los sectores, y las características de las futuras tecnologías disponibles, así como las fuentes actuales y futuras de suministro de energía primaria. Con estos insumos, el modelo tiene como objetivo suministrar servicios energéticos con el mínimo coste global, haciendo inversiones en equipos, seleccionando suministros de energía primaria y tomando decisiones en el mercado energético para cada región.

La selección por el modelo de los equipos de generación está basada en el análisis de las características de tecnologías de generación alternativas, según criterios de la economía del suministro energético y criterios medioambientales.

El alcance del modelo va más allá de cuestiones puramente energéticas o a la representación de las emisiones. El modelo además ofrece un análisis de las políticas energéticas y medioambientales, las cuales pueden ser representadas con exactitud gracias a la claridad de la representación de tecnologías y combustibles en todos los sectores.

El modelo TIMES se ha utilizado en infinidad de estudios, incluyendo una investigación sobre las perspectivas de futuro del hidrógeno y las pilas de combustible, sobre el futuro papel que jugará la energía nuclear de fusión o los impactos de la energía eólica sobre el uso de combustibles. Además, el modelo también ha sido empleado por la Comisión Europea para simular políticas integradas en el uso de fuentes renovables, la mitigación del cambio climático y la mejora de la eficiencia energética (el llamado objetivo 20-20-20).

2.2.2. Clasificación

A continuación se va a clasificar el modelo en función de los parámetros empleados en el resto de modelos, tabla 3.

Propósito	General: explorar. Específico: analizar caminos para la descarbonización, examinar tecnologías y costes mínimos.
Estructura	Suministro de energía con restricciones. Planificación a través de la aproximación al mínimo coste. La demanda es exógena y el suministro modelado
Tratamiento analítico	De abajo-arriba.
Metodología básica	Optimización de costes.
Enfoque matemático	Programación lineal y programación dinámica.
Alcance geográfico	Local, nacional, regional y global.
Cobertura sectorial	Todos los sectores energéticos.
Horizonte temporal	Medio, largo plazo. El usuario selecciona periodos de tiempo flexibles, separados en tres grupos, mensual, semanal y diario
Requerimiento de datos	Cuantitativos, monetarios y desagregados.

Tabla 3: Clasificación modelo TIMES

2.2.3. Estructura

Como se ha comentado en la introducción, el modelo TIMES abarca todos los pasos del proceso energético, desde los recursos primarios, pasando por la cadena de procesos de transformación, transporte, distribución y conversión de la energía, hasta el consumidor final de la energía.

Por el lado de la oferta, los productores abarcan los procesos de extracción de combustibles, las transformaciones primarias y secundarias y las importaciones y exportaciones exógenas. Mediante su transporte y distribución, la energía se entrega a la demanda, que en el modelo se estructura por sectores: residencial, comercial, agrícola, transporte y sectores industriales.

Las relaciones tecnológicas y económicas entre las partes de oferta y demanda son la base de la estructura del modelo TIMES.

Esto se realiza mediante el sistema energético de referencia (RES):

- **Materias primas:** son vectores energéticos (como los combustibles), servicios energéticos, materiales, flujos monetarios y emisiones; una mercancía o servicio se produce o se consume por alguna tecnología.
- **Tecnologías o procesos:** son representaciones de los equipos que transforman las materias primas en otros productos básicos. Los procesos pueden ser fuentes principales de materias primas (por ejemplo, los procesos de minería, procesos de importación), o las actividades de transformación, tales como plantas de conversión que producen

electricidad, plantas de procesamiento de energía, equipos de consumo como automóviles y sistemas de calefacción, etc.

- Flujo de materias primas: son las relaciones entre las materias primas y los procesos, (por ejemplo, la generación de electricidad a partir del viento). Cada relación es de la misma naturaleza que la materia prima, que se une a un proceso en particular, y representa una entrada o una salida de ese proceso.

Estas tres entidades se utilizan para construir un sistema energético que caracteriza al país o región en cuestión. Todos los modelos de TIMES tienen sistemas de referencia energético, que son modelos básicos del sistema energético antes del cambio, ya sea para una región en particular o para un escenario concreto. En la figura 5 se muestra un esquema del RES, [Loulou y Labriet \(2007\)](#).

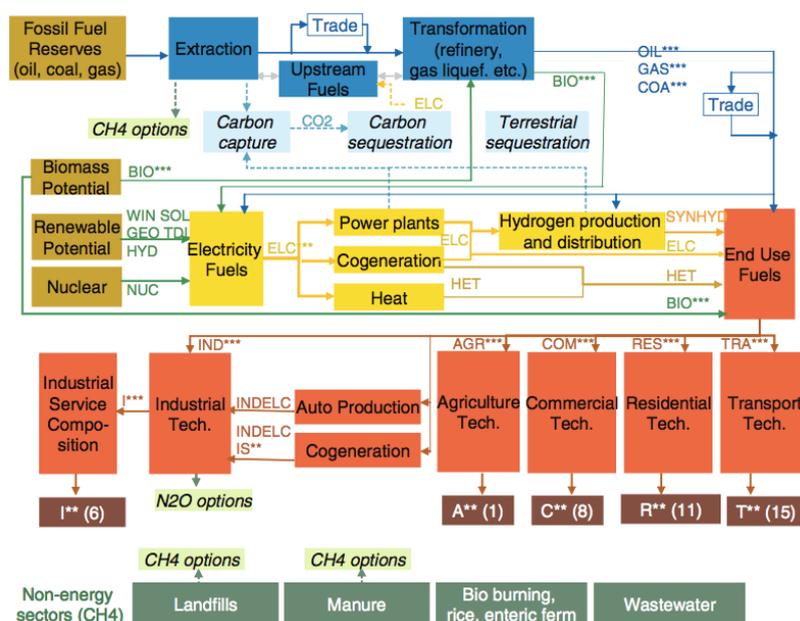


Figura 5: Esquema del RES del modelo TIMES

- Escenarios: necesarios para el análisis de modelos energéticos mediante TIMES. Un primer escenario es generado mediante la ejecución del modelo en ausencia de limitaciones políticas. Estos escenarios de referencia no están normalmente alineados con las previsiones nacionales de energía (generados mediante la simulación de la demanda energética futura y su suministro), principalmente porque TIMES optimiza el sistema energético proporcionando la solución de menor coste.

Un segundo escenario es entonces establecido mediante la imposición de una o varias restricción políticas (como una cuota mínima de energías renovables, la cantidad máxima de emisiones de GEI o un nivel mínimo de seguridad energética) y el modelo genera un sistema energético de mínimo coste con diferentes opciones tecnológicas y combustibles.

Una vez que todas las entradas, las limitaciones y los escenarios se han puesto en marcha, el modelo intenta resolver y determinar el sistema energético que satisface la demanda du-

rante el periodo de tiempo analizado con el mínimo coste. Lo realiza tomando decisiones de inversión y operación de equipos, de suministros de energía primaria y decisiones comerciales relacionadas con la energía, para cada región. TIMES asume previsiones perfectas, por lo que todas las decisiones de inversión se toman en cada período con pleno conocimiento de los acontecimientos futuros. Los resultados del modelo son los flujos de energía, los precios de las materias primas energéticas, las emisiones de GEI, los costes finales de la energía y los costes marginales de la reducción de emisiones de GEI.

Esto se muestra en la figura 6 extraída de Loulou y cols. (2005) en la que se puede observar las entradas al sistema, las relaciones entre estas y los procesos, y las salidas del modelo.

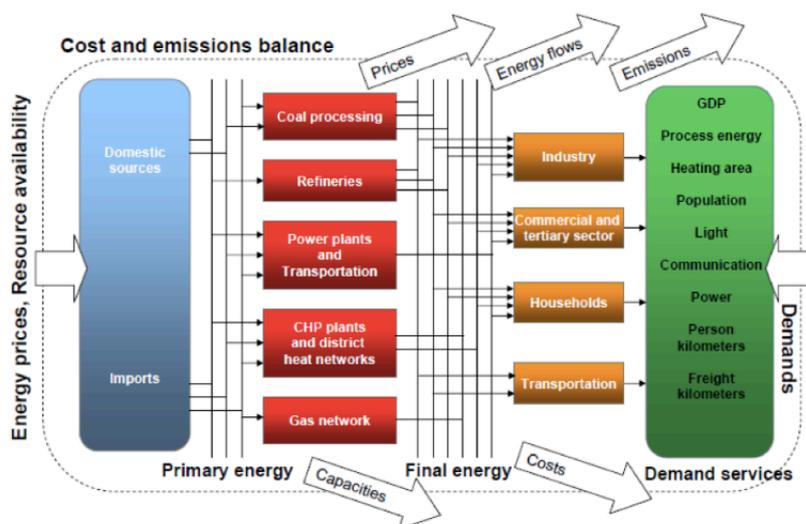


Figura 6: Esquema del modelo TIMES

2.2.4. Interfaz de usuario

Dado que no ha sido posible obtener acceso al software del modelo, no ha sido posible insertar ni comentar capturas de pantalla del funcionamiento del modelo.

2.2.5. Ejemplo de uso

Para conocer mejor el modelo TIMES, el ejemplo de uso que se ha utilizado es un artículo de la Universidad Técnica de Lisboa, Electricity decarbonisation pathways for 2050 in Portugal: A TIMES based approach in closed versus open systems modelling, ?, que analiza las oportunidades del sector de producción eléctrica en Portugal con vistas a su descarbonización para el año 2050.

En este artículo se presenta un ejercicio de modelización para optimizar las nuevas inversiones en la capacidad de generación eléctrica a largo plazo con el objetivo de alcanzar el 60% de la descarbonización del sector eléctrico portugués para el año 2030 y el 95% para el año 2050. Se plantean dos escenarios, uno considerando a Portugal como un sistema aislado y otro considerando los intercambios con España. Para ambos escenarios, la evolución en el

tiempo de la demanda de electricidad, los precios del combustible, el costo de las tecnologías y la dinámica de la demanda son los mismos.

Como supuestos en el modelo, se considera que la evolución de la demanda de electricidad hasta el año 2020 según las estimaciones del gobierno portugués. Para los periodos 2020-2030 y 2030-2050 la tasa de crecimiento medio anual es del 1.3% y del 1,5% respectivamente.

A continuación se muestran gráficamente los resultados del artículo:

TIMES ha generado un modelo energético empleando los recursos disponibles, al mínimo coste y cumpliendo las limitaciones introducidas (emisiones). La capacidad instalada de los diferentes recursos varía en función de considerar el sistema portugués cerrado o su interconexión con España. En el supuesto de sistema aislado la capacidad instalada de las diferentes tecnologías es mayor en prácticamente todo el periodo analizado empleando, figura 7.

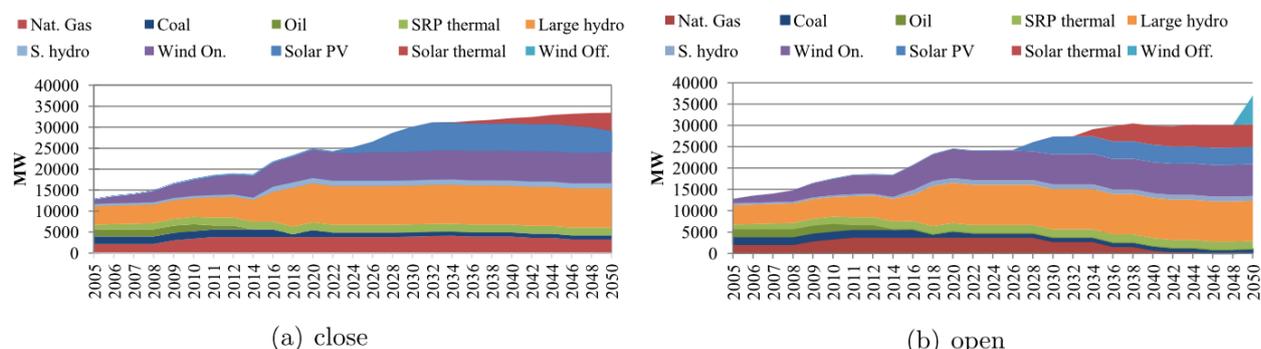


Figura 7: Ejemplo de TIMES con sistema aislado

En función de la capacidad instalada, se obtiene para ambos supuestos la generación eléctrica para el periodo de tiempo considerado. En el supuesto de interconexión figuran también los intercambios de electricidad con España, figura 8.

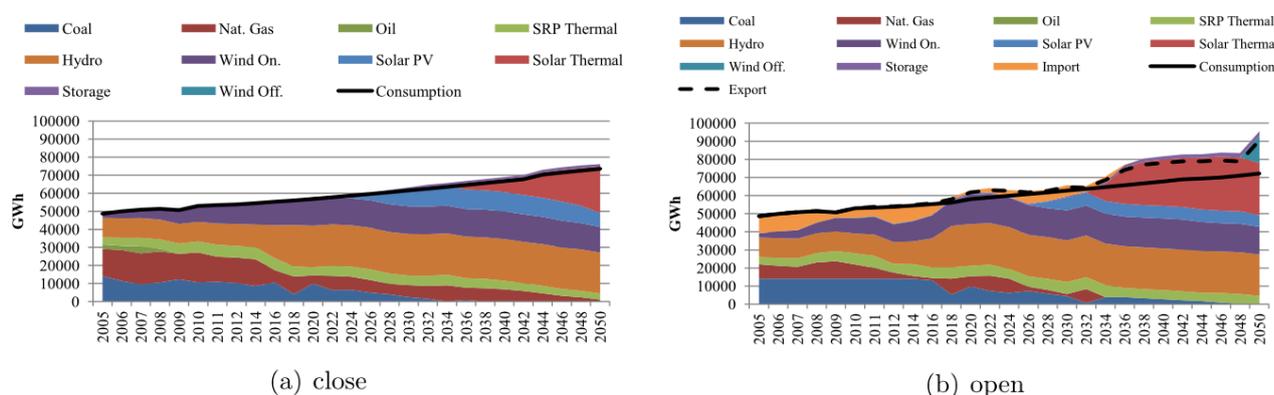


Figura 8: Ejemplo de TIMES con interconexión

En lo relativo a los costes, los más importantes en un sistema abierto son la inversión y operación y los costos relativos al precio del combustible en un escenario de sistema cerrado, figura 9.

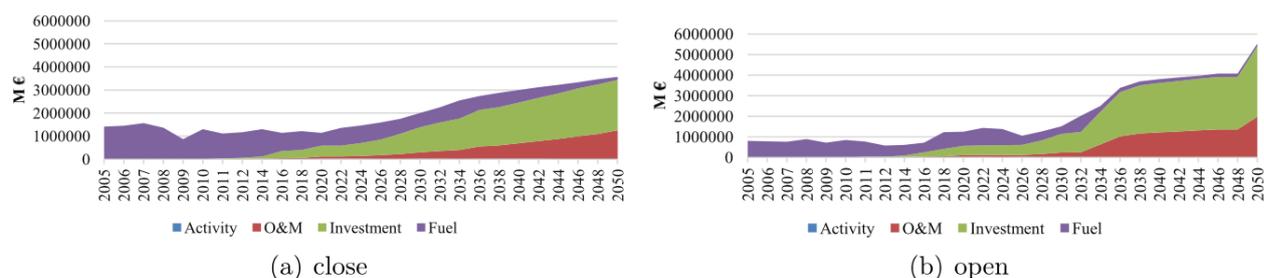


Figura 9: Ejemplo de TIMES, costes con el sistema cerrado

En este artículo y mediante el empleo de TIMES se demuestra que es posible desarrollar un modelo energético en un país desarrollado con vistas a la descarbonización de su sistema eléctrico para el año 2050.

2.2.6. Análisis de variables

Al igual que ocurre con la sección *interfaz de usuario* de este modelo, no ha sido posible completar una lista de variables completa con su descripción, unidades, comentarios, etc. Por lo que únicamente se incluye una lista con las variables empleadas en TIMES extraídas de la bibliografía, tabla 4.

Variable	Descripción	Unidades
Producto interior bruto (PIB)		
Población		
Consumo de energía residencial		
Consumo de energía industrial		
Consumo energético del sector servicios		
Consumo energético de los sectores forestal, pesca y agricultura		
Cuota de combustible en el consumo energético del sector servicios		
Cuota de combustible en los sectores forestal, pesca y agricultura		
Coste de la importación de energía		
Limitaciones a la importación de energía		
Valor de la producción		
Número de días de calefacción		
Superficie útil por euro de valor añadido bruto		
Ratio de demolición		
Eficiencia de la construcción en construcciones renovadas		
Eficiencia de la construcción en construcciones no renovadas		
Ratio de renovación		
Participación de 13 proveedores de energía en la demanda final de energía para calefacción residencial 2007		
Tasas de demolición del sistema de calefacción		
Proporción de suministradores de energía en los nuevos sistemas de calefacción instalados 2008-2030		
Superficie útil por persona		
Participación de la superficie existente en viviendas unifamiliares y multifamiliares y en viviendas		
Participación de nuevos edificios en viviendas unifamiliares y multifamiliares y en bloques de apartamentos		

Eficiencia de los sistemas de calefacción		
Demanda final de energía para la producción de agua caliente por metro cuadrado		
Demanda final de energía para la producción de agua caliente por persona		
Proporción de energía final para la producción de agua caliente		
Eficiencia de los sistemas de producción de agua caliente		

Tabla 4: Variables contenidas en el modelo TIMES

2.3. PRIMES

2.3.1. Introducción

El modelo PRIMES (Price-Induced Market Equilibrium System) es un modelo energético desarrollado por el Energy Economy Environment Modelling Laboratory (E3Mlab) de la Universidad Técnica Nacional de Atenas. El modelo combina una base microeconómica con representaciones de ingeniería destinadas a la simulación de los cambios estructurales y las transiciones a largo plazo.

Desde sus comienzos (1993-1994), el modelo fue diseñado para enfocarse en los mecanismos de mercado y proyectar los precios que influyen en la evolución de la demanda y suministro de energía y del desarrollo tecnológico. PRIMES ha sido diseñado como un sistema modular cuyo objetivo es representar el comportamiento de los agentes (demandantes y suministradores de energía) y su interacción en múltiples mercados. El modelo ofrece proyecciones detalladas a largo plazo de la demanda de energía, el suministro, los precios y la inversión para el futuro, abarcando todo el sistema energético, incluyendo las emisiones para cada país europeo y el comercio de materias primas energéticas. PRIMES se centra en los precios como medio de equilibrar la oferta y la demanda energética simultáneamente en varios mercados de energía y emisiones. Para ello, determina los volúmenes de equilibrio de mercado mediante la búsqueda de los precios de cada recurso energético de tal manera que los productores encuentren la mejor cantidad de suministro que coincida con la que los consumidores deseen utilizar.

El modelo evalúa el impacto de las políticas energéticas y medioambientales y las medidas como los impuestos, subsidios o políticas de apoyo a las energías renovables y la eficiencia energética aplicadas en los países pertenecientes a la UE.

Desde mediados de los años 90 hasta hoy Primes se ha extendido de forma continua y actualizada. El modelo ha sido ampliamente utilizado en estudios de reestructuración a medio y largo plazo del sistema energético de la UE, en vistas del cambio climático, el desarrollo de las energías renovables, la eficiencia energética y las evaluaciones de impacto de numerosas políticas energéticas y medioambientales comunitarias.

2.3.2. Clasificación

A continuación se va a clasificar el modelo en función de los parámetros en el resto de modelos, tabla 5.

2.3.3. Estructura

El modelo está estructurado en sub-modelos, que representan el comportamiento de un agente específico. Los sub-modelos están relacionados entre sí mediante la aplicación de un algoritmo que determina los precios de equilibrio en múltiples mercados y los volúmenes que cumplen con el equilibrio y con las limitaciones (como las emisiones). Matemáticamente lo

Propósito	General: explorar. Específico: proporciona proyecciones detalladas de la demanda energética, del suministro, precio e inversiones futuras.
Estructura	La demanda y el suministro se simulan en un bucle cerrado. Las tarifas y precios son endógenos, reflejando costes y condiciones de mercado.
Tratamiento analítico	Híbrido.
Metodología básica	Basado en agentes.
Enfoque matemático	Modelo de equilibrio.
Alcance geográfico	Estados miembros de la UE28, países del oeste de los Balcanes (Albania, Serbia, etc.) Suiza, Noruega y Turquía. .
Cobertura sectorial	Todos los sectores energéticos.
Horizonte temporal	Medio, largo plazo, en plazos anuales.
Requerimiento de datos	Cuantitativos, monetarios y desagregados.

Tabla 5: Clasificación modelo PRIMES

resuelve mediante un problema de equilibrio con restricciones, que permite que los precios se determinen de forma explícita.

El comportamiento de los agentes son modelados por sectores basándose en bases microeconómicas: cada módulo de demanda formula un agente representativo maximizando los beneficios de la demanda de energía y de insumos no energéticos, sujeto a precios, presupuesto y a otras limitaciones referidas a la tecnología, emisiones o disponibilidad de combustibles.

Los módulos de la oferta determinan los precios de materias primas y de infraestructura por sectores de uso final para reflejar los costes, los márgenes, los impuestos y las condiciones del mercado. Los precios influyen en la demanda y se modela un bucle cerrado entre la oferta y la demanda de forma simultánea para todos los mercados. Ambos módulos de oferta y demanda pueden estar sujetos a restricciones de todo el sistema en función de objetivos globales, por ejemplo, sobre las emisiones, energías renovables, eficiencia, dependencia de las importaciones, etc.

De acuerdo a [E3MLab \(2014\)](#), la secuencia que siguen las interacciones del modelo es la siguiente:

- Los agentes (residencial, industria, servicios, generación eléctrica, etc), actúan de manera individual para optimizar su beneficio y/o utilidad, influenciado por hábitos, riesgo, tecnología, fiabilidad del sistema, etc.
- De acuerdo a ello determinan flujos de energía, inversiones y elecciones de tecnología.

- La demanda y el suministro de materias primas interactúan entre si en un mercado con régimen de competencia.
- Los mercados de energía (y emisiones) se limpian para determinar los precios que equilibran oferta y demanda.
- Las tarifas de las materias primas reflejan los costes y aplican una metodología de Ramsey-Boiteux para recuperar los costes fijos y determinar una distribución de las tarifas en todos los sectores.
- El equilibrio del mercado se extiende durante todo el horizonte temporal.
- Se aplican las restricciones generales o sectoriales, por ejemplo, las emisiones de dióxido de carbono.

Todo ello se muestra en la figura 10, en la que se aprecia la estructura básica del modelo, los agentes de la oferta y la demanda, las interacciones de entre ellos y los factores externos como las limitaciones, [E3MLab \(2014\)](#).

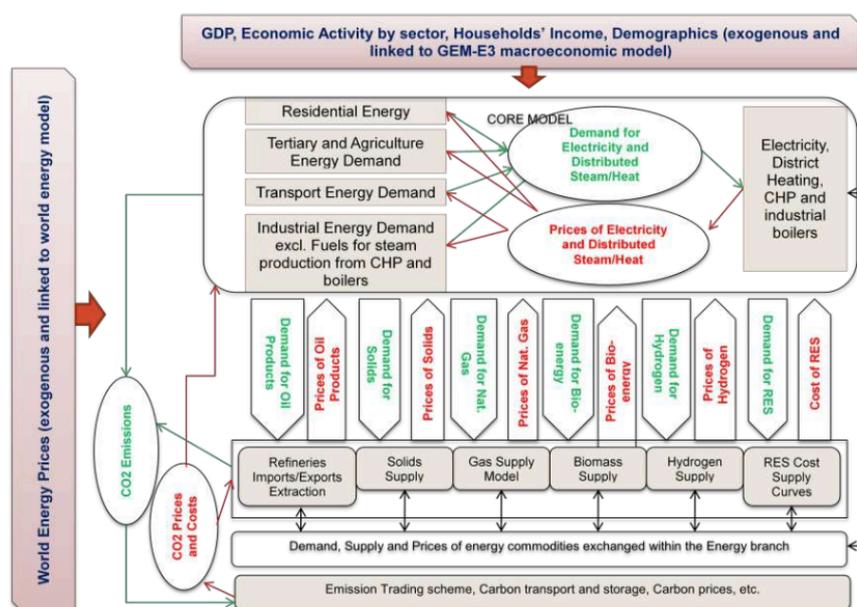


Figura 10: Estructura básica del modelo PRIMES

2.3.4. Interfaz de usuario

Dado que no ha sido posible obtener acceso al software del modelo, no ha sido posible insertar ni comentar capturas de pantalla del funcionamiento del modelo.

2.3.5. Ejemplo de uso

Como ejemplo de uso se ha seleccionado un informe desarrollado por Eurelectric (Unión de la industria eléctrica europea), titulado *Power choice. Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050* [Eurelectric \(2010\)](#) en el que se emplea PRIMES para examinar diferentes

escenarios en el que alcanzar una reducción de emisiones de CO₂ del 75/100 para el año 2050 en la Unión Europea través de:

- Tecnologías con bajas emisiones de CO₂ como las energías renovables, la energía nuclear o la captura y almacenamiento de CO₂.
- A través de una generación, transporte y uso de electricidad de forma inteligente y eficiente.
- Promocionando el uso de los vehículos eléctricos.
- Mediante una mejora de la eficiencia energética.
- Todo ello a un coste de la energía menor que al del escenario de partida.

Para ello se divide el marco temporal en tres periodos con diferencias macroeconómicas: de 2008 a 2014 recesión, de 2015 a 2022 recuperación y de 2023 a 2050 bajo crecimiento estable.

Además se han realizado otros supuestos relativos al crecimiento de la población, PIB per capita, proyecciones de movilidad, precios de los combustibles fósiles y líneas de investigación.

Como resultado se han obtenido una serie implicaciones para alcanzar los objetivos marcados: en los requerimientos de energía, en el sector eléctrico, en las emisiones, en la dependencia de las importaciones e implicaciones en los costes e inversión.

A modo de ejemplo, en las implicaciones de requerimientos de energía el modelo confirma que existe un gran potencial en la UE para la reducción de la demanda de energía respecto del escenario de partida mediante el uso generalizado de tecnologías avanzadas en todos los sectores. Ello se muestra en la figura 11 que compara la demanda energética en el escenario de partida y en el de la simulación, [Eurelectric \(2010\)](#).

EU27 - PRIMES MODEL	FINAL ENERGY SAVINGS IN %								
	POWER CHOICES VS BASELINE 2009			POWER CHOICES VS NO POLICY CASE			BASELINE 2009 VS NO POLICY CASE		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
INDUSTRY	0.4%	1.1%	19.1%	4.4%	8.1%	23.0%	4.0%	7.0%	4.8%
RESIDENTIAL	2.7%	11.8%	36.6%	10.1%	23.9%	49.7%	7.6%	13.7%	20.5%
SERVICES	7.9%	24.1%	46.6%	15.6%	32.6%	56.6%	8.3%	11.3%	18.7%
AGRICULTURE	4.5%	10.5%	29.9%	7.1%	14.9%	36.3%	2.7%	4.9%	9.2%
TRANSPORT	2.6%	7.4%	29.3%	12.2%	25.2%	53.5%	9.9%	19.2%	34.2%
TOTAL	2.7%	8.8%	31.3%	10.2%	21.4%	45.4%	7.7%	13.8%	20.4%

Figura 11: Comparación de la demanda energética mediante PRIMES

2.3.6. Análisis de variables

Como ocurre en TIMES, no ha sido posible descargar el software para su análisis, por lo que el desarrollo de esta sección se basa únicamente en la recopilación de la bibliografía

existente, tabla 6.

Variable	Descripción	Unidades
PIB		
PIB per capita		
Población		
Consumo sector residencial		
Consumo sector industrial		
Consumo sector transporte		
Consumo sector de producción de energía		
Consumo de otros sectores		
Emisiones sector industrial		
Emisiones sector transporte		
Emisiones sector de producción de energía		
Emisiones de otros sectores		
Emisiones sector residencial		
Proyecciones de movilidad		
Precios de los combustibles fósiles		
Eficiencia energética en los usos finales de la energía		
Pérdidas en cada tecnología energética		
Coste de las tecnologías energéticas renovables		
Eficiencia térmica de las plantas de combustibles fósiles		
Costes normalizados de la energía para cada tecnología		
Cuota de los vehículos de pasajeros		
Evolución de las baterías		
Capacidad de expansión de cada tecnología energética		
Sistemas de almacenamiento y captura de carbono		
Evolución de las emisiones		
Redes eléctricas avanzadas		
Generación distribuida		

Tabla 6: Variables contenidas en el modelo PRIMES

2.4. WoLiM

2.4.1. Introducción

El modelo WoLiM (World Limits Model) es un modelo Energético-Económico-Medioambiental desarrollado por el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid. Modelado mediante dinámica de sistemas, es una gran plataforma global que integra datos de diversas disciplinas: estimaciones geológicas del agotamiento de combustibles fósiles, desarrollo tecnológico de las energías renovables y alternativas tecnológicas, estimaciones de variables económicas como la intensidad energética, la demanda de energía por sectores basada en datos históricos, el cambio climático debido al consumo de energía, etc.

Precisamente la gran cantidad de datos que integra y su simplicidad estructural son las principales ventajas de WoLiM. Mientras que otros estudios de agotamiento de combustibles son relativamente abundantes en la literatura reciente, estos no ofrecen una perspectiva integrada de todas las fuentes de energía teniendo en cuenta su posible evolución futura, ni incluyen la demanda de energía generada por el sistema socio-económico. Por otra parte, se han desarrollado otros modelos globales de Energía-Economía-Medio ambiente, sin embargo, algunos de esos modelos consideran explícitamente las limitaciones de expansión de energía, como el peak oil, asumiendo que la demanda de energía en el futuro será suministrada sin restricciones significativas. El modelo incluye los patrones de agotamiento de los recursos no renovables y la sustitución por energías alternativas, las estimaciones de desarrollo y penetración en el mercado de las tecnologías alternativas, la demanda de energía de la economía mundial bajo diferentes escenarios socioeconómicos, el potencial sostenible de las energías renovables y la estimaciones de las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de combustibles fósiles, todos ellos vistos en un marco dinámico, [Capellán-Pérez y cols. \(2014\)](#).

2.4.2. Clasificación

Siguiendo la clasificación hecha por [Beeck \(1999\)](#), a continuación se muestra la clasificación del modelo WoLiM, tabla 7.

2.4.3. Estructura

El modelo WoLiM está basado en una estructura lineal, en la que se selecciona un escenario de referencia de entre un conjunto de políticas y supuestos económicos y tecnológicos, integrados coherentemente, que forman la proyección socioeconómica:

- Escenario 1: optimismo económico con algunas reformas en el mercado.
- Escenario 2: desarrollo global sostenible.
- Escenario 3: competencia regional/mercados regionales.
- Escenario 4: desarrollo regional sostenible.

Propósito	General: explorar. Específico: evaluación. El modelo permite seleccionar un escenario base y unas políticas, y en función de las variables introducidas define la posibilidad o imposibilidad de realizar ese modelo en el futuro.
Estructura	Bajo grado de endogenización, escenarios de referencia predeterminados.
Tratamiento analítico	Abajo-arriba.
Metodología básica	Modelo econométrico y de simulación.
Enfoque matemático	Programación lineal.
Alcance geográfico	Mundial.
Cobertura sectorial	Incluye el sector transporte, edificación, industria y generación eléctrica.
Horizonte temporal	Medio-largo plazo.

Tabla 7: Clasificación modelo WoLiM

La proyección socioeconómica, junto a la intensidad energética establece la demanda mundial de energía, que es desagregada por sectores de acuerdo a su uso final, (electricidad, industria, transporte, etc.). La demanda de energía de cada sector se desagrega en la demanda de recursos (gas, combustibles, electricidad, etc.). Estas necesidades se comparan con la producción de cada recurso, limitados por los picos basados en geología y la tasa de sustitución tecnológica. Por último se calculan las emisiones netas de CO₂ y sus niveles de concentración.

En la figura 12 se muestra la lógica de funcionamiento básico de WoLiM, Capellán-Pérez y cols. (2014).

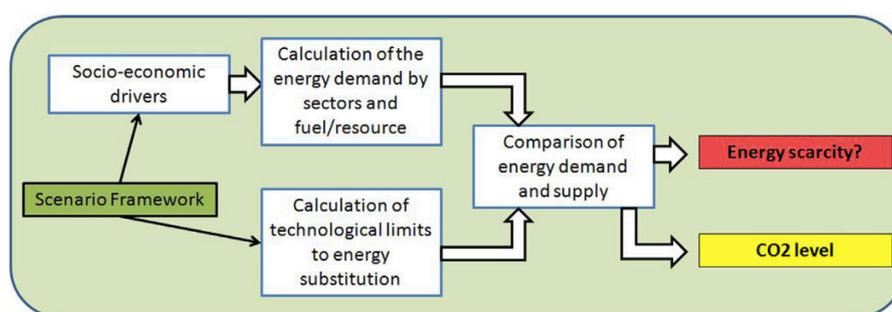


Figura 12: Lógica de funcionamiento básico del modelo WoLiM

A través del siguiente diagrama causal del modelo y sus elementos básicos Capellán-Pérez y cols. (2014), figura 13, se pretende representar la estructura que se ha mencionado: las líneas discontinuas verdes indican la proyección socioeconómica; las naranjas la intensidad energética que deriva en las demandas de energía desglosada por sectores; las azules las tecnologías de suministro de energía; por último mediante el recuadro discontinuo gris se muestran los resultados del modelo.

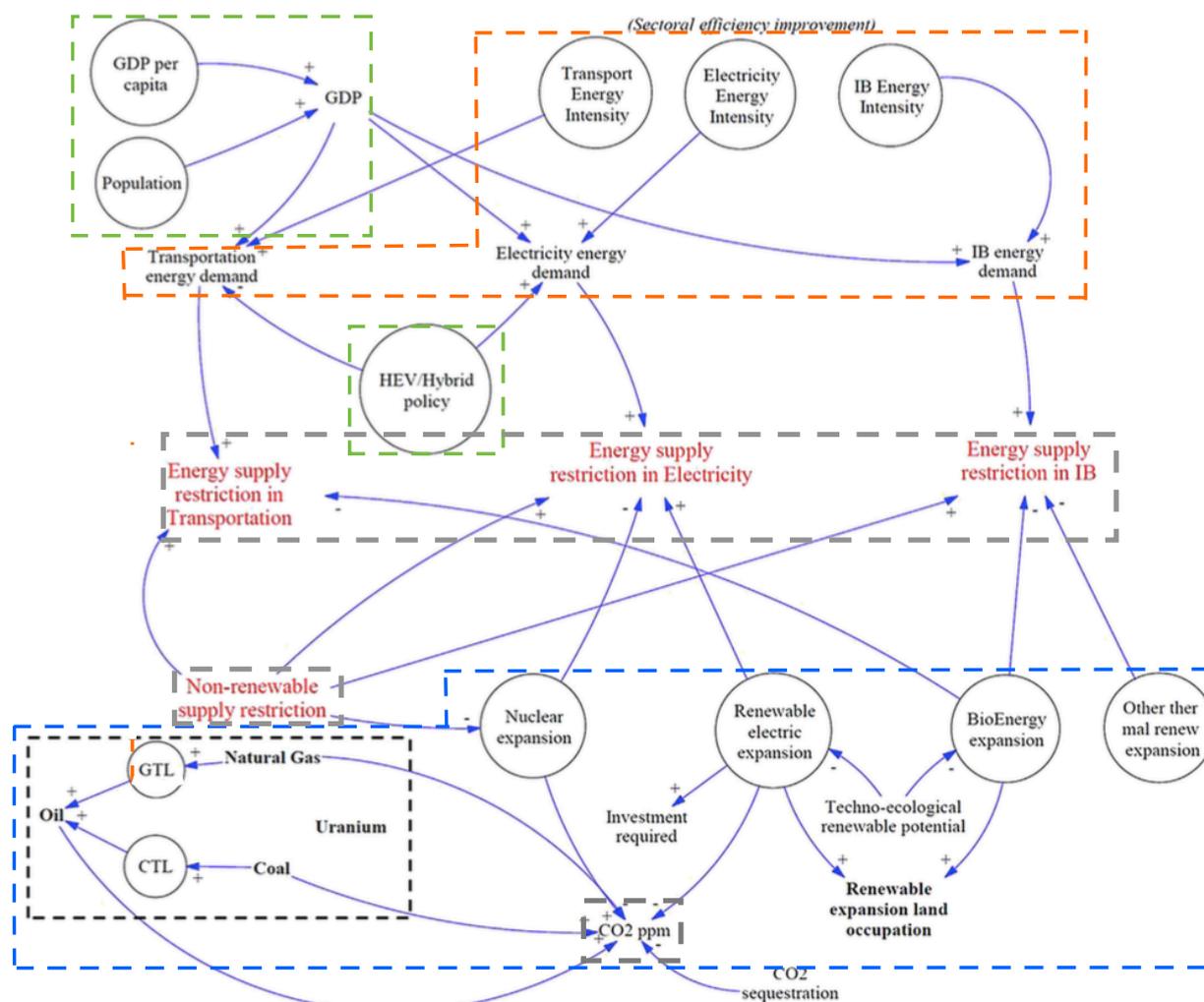


Figura 13: Diagrama causal del modelo WoLiM

2.4.4. Interfaz de usuario

A continuación se muestra una captura de pantalla con la interfaz de usuario del modelo WoLiM, figura 14.

En ella se puede ver las variables relacionadas con el PIB y la población. En la parte inferior de la pantalla se ubica una carpeta desplegable que permite variar las distintas ventanas del modelo (más de 40). En la parte izquierda figuran una serie de herramientas de Vensim que permiten visualizar los resultados mediante datos, gráficas y tablas del modelo energético desarrollado.

2.4.5. Ejemplo de uso

Para el modelo WoLiM se ha tomado como ejemplo un estudio realizado por el Instituto de Economía de la Universidad del País Vasco junto a los departamentos de Ingeniería de Sistemas y Control Automático, de Física Aplicada y de Economía Aplicada de la Universidad de Valladolid [Capellán-Pérez y cols. \(2014\)](#). En dicho estudio se empleó WoLiM para evaluar diversos escenarios que replicaron los escenarios habituales en los estudios de evaluación

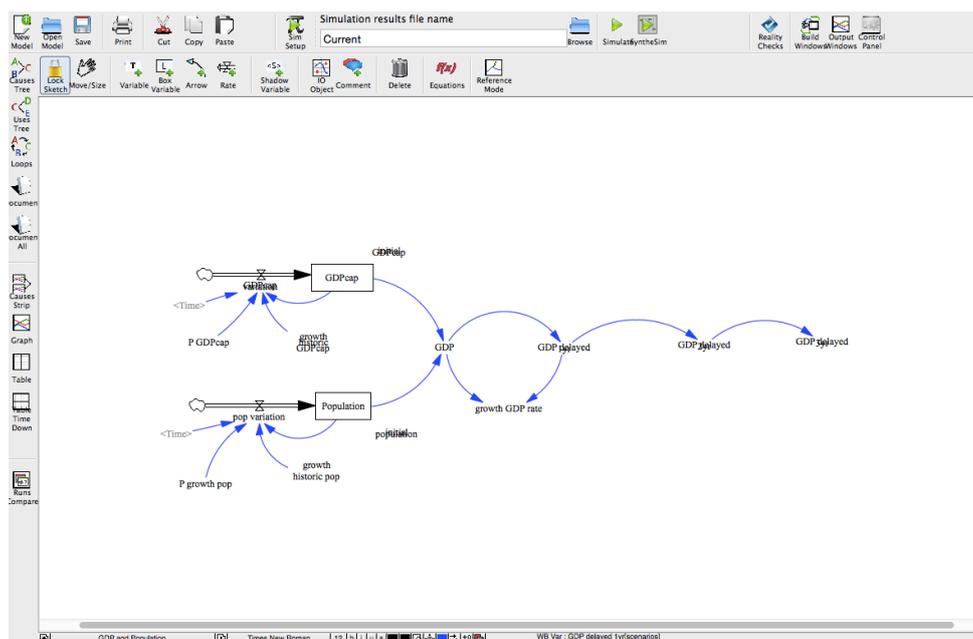


Figura 14: Captura de la pantalla de inicio de WoLiM

ambiental global, los informes de evaluación del IPCC o la perspectiva medioambiental mundial del UNEPs.

A continuación se muestra una tabla, figura 15, con las hipótesis y políticas de dichos modelos. Los resultados del estudio mostraron que existe un riesgo significativo de escasez de energía. Estas limitaciones críticas de energía pueden provocar cambios dramáticos inesperados en las sociedades y en la configuración del mundo, por lo que todos los escenarios analizados son imposibles de alcanzar para el año 2050. En la figura 16 se muestra los resultados de la demanda y producción eléctrica para los escenarios analizados.

2.4.6. Análisis de variables

A continuación se muestran las variables exógenas que emplea el modelo WoLiM, tabla 8.

Variable	Descripción	Unidades
Producto Interior Bruto per capita	PIB	€/habitante
Población	Población	Habitantes
Mejora de la eficiencia del transporte	Mejora anual	%
Mejora de la eficiencia eléctrica	Mejora anual	%
Mejora de la eficiencia en la industria	Mejora anual	%
Mejora de la eficiencia en edificios	Mejora anual	%
Mejora de la eficiencia por sectores	Asíntota horizontal que representa el valor mínimo de la intensidad energética	-
Disponibilidad de recursos no renovables	Curvas de máxima extracción	-
Disponibilidad de recursos: carbón-a-líquido	Crecimiento anual carbón-a-líquido	%
Disponibilidad de recursos: gas-a-líquido	Crecimiento anual gas-a-líquido	%
Energía solar fotovoltaica	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Energía solar de concentración	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Energía eólica	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Energía hidroeléctrica	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Energía geotérmica	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Bioenergía y residuos	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -
Energía oceánica	Crecimiento anual, potencial disponible	%, -

Energía nuclear	Crecimiento anual, restringido por la curva de extracción máxima de uranio	%
Bioenergía de 2 ^a generación	Crecimiento anual, potencial disponible	%, Mha
Bioenergía de 3 ^a generación	Crecimiento anual	%
Residuos	Crecimiento anual	%
Energías renovables y eficiencia térmica en el sector industrial	Cuota de mercado en el periodo p	%
Energías renovables y eficiencia térmica en edificios	Cuota de mercado en el periodo p	%
Transporte alternativo: vehículos eléctricos e híbridos	Cuota de mercado en el periodo p	%
Transporte alternativo: vehículos de gas natural	Crecimiento anual	%
Programa de reforestación	Programa global	-

Tabla 8: Variables contenidas en el modelo WoLiM

Scenario input		0 – BAU	Scenario 1 Economic optimism with some market reforming	Scenario 2 Global sustainable development	Scenario 3 Regional competition	Scenario 4 Regional sustainable development
Socioeconomic (% 2010–2050)	GDPcap	Hist +1.9% (1960–12)	+3%	+2.4%	+1.1%	+1.9%
	Population	UN Medium-Variant +0.75%	+0.5%	+0.65%	+0.81%	+0.8%
Sectoral efficiency improvements	α_{transp}	Past trends (-0.67%)	Rapid (-0.9%)	Rapid (-0.9%)	Deglobalization (-1.5%)	Deglobalization (-1.5%)
	d_{elec}	Past trends (0%)	Past trends (0%)	Past trends (0%)	Past trends (0%)	Past trends (0%)
	q_{BU}	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)	Past trends (-0.5%)
Resource availability	I_{min}^a	25%	25%	15%	25%	15%
	Non-renewables	Best Guess	Best guess (coal, conv. oil) High case (gas, unconv. oil)	Best Guess	Best Guess	Best Guess
Electric renewables	CTL, GTL	Crash program (+15%)	Crash program (+20%)	Crash program (+20%)	Crash program (+15%)	Crash program (+15%)
	Solar FV & CSP	Medium (+15%)	Past trends (+19%)	Very rapid (+25%)	Medium (+15%)	Very rapid (+25%)
	Wind	Medium (+20%)	Past trends (+26%)	Very rapid (+30%)	Medium (+15%)	Very rapid (+30%)
Nuclear	Hydroelectric, Geothermal, Bioenergy & Waste	Past trends (slow)	Past trends (slow)	Very rapid (x3 past trends)	Past trends (slow)	Very rapid (x3 past trends)
	Rapid (+20% from 2020)	Rapid (+20% from 2020)	Very rapid (+30% from 2020)	Rapid (+20% from 2020)	Very rapid (+30% from 2020)	
BioEnergy (100 MHa)	Constant	+3% from 2015	+1.5% from 2015	Constant	Progressive shutdown	
	2nd generation	Slow (+8%, 100 MHa available)	Rapid (+20%, 200 MHa available)	Rapid (+20%, 200 MHa available)	Slow (+8%, 100 MHa available)	Medium (+15% from 2035)
	3rd generation	Slow (+8% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Slow (+8% from 2035)	Medium (+15% from 2035)
Thermal renewables & efficiencies	Residues	Slow (+8% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Rapid (+20% from 2025)	Slow (+8% from 2035)	Medium (+15% from 2035)
	Industrial sector (market share 2050)	Low (12.1%)	Medium (23.1%)	Rapid (37.6%)	Low (12.1%)	Rapid (37.6%)
Alternative transport ^b	Buildings sector (market share 2050)	Low (4.7%)	Medium (22.6%)	Rapid (48%)	Low (4.5%)	Rapid (48%)
	HEV & Hybrid (market share 2050)	Medium (9%)	Rapid (18%)	Very rapid (36%)	Medium (9%)	Very rapid (50%)
Afforestation program	NGVs	Past trends (+20% annual)	Past trends (+20% annual)	Past trends (+20% annual)	Past trends (+20% annual)	Past trends (+20% annual)
		-	-	350 MHa	-	350 MHa

Figura 15: Hipótesis y políticas empleadas en el modelo WoLiM

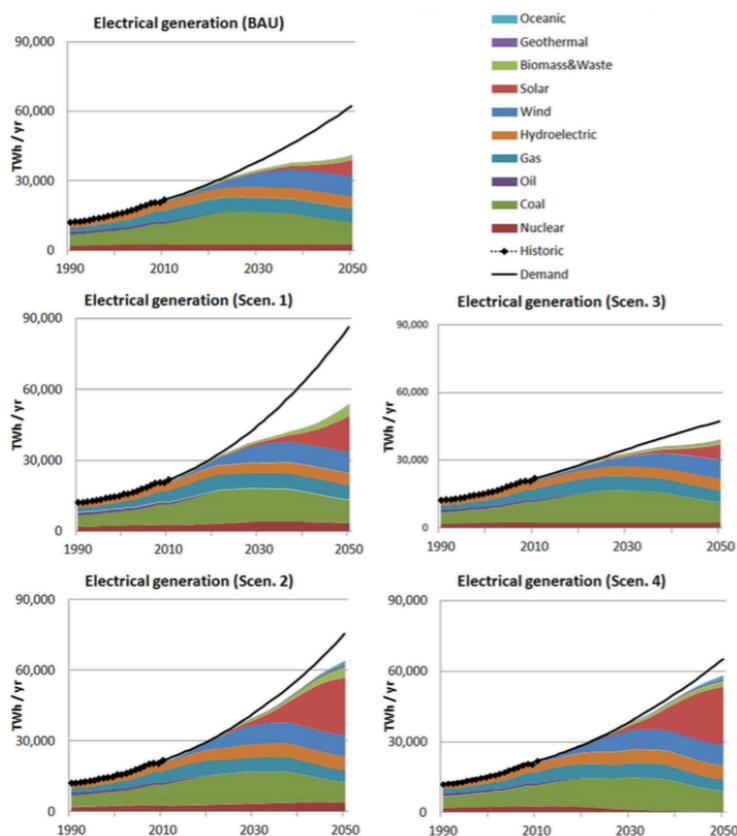


Figura 16: Resultados del estudio de escenarios mediante WoLiM

2.5. RETScreen

2.5.1. Introducción

El modelo RETScreen es una herramienta de ayuda a la decisión, desarrollado en 1996 por el Natural Resource Canadá, para evaluar la producción de energía, los costes del ciclo de vida y la reducción de emisiones de gases de invernadero para varios tipos de tecnologías energéticas propuestas. Desarrollado para superar las barreras a la implementación de tecnologías energéticas limpias en las primeras fases de viabilidad, proporciona una metodología probada para la comparación de tecnologías energéticas convencionales y limpias mediante análisis rápidos y precisos, que permiten la detección de múltiples proyectos potenciales, de tal manera que los más prometedores puedan identificarse y aplicarse.

Está constituido por dos programas de software de uso público de gestión de energías limpias, para el análisis de la viabilidad de proyectos de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración, así como para el análisis del rendimiento energético operativo:

- RETScreen 4 es una herramienta de software de análisis de proyectos de energía limpia basada en Excel.
- RETScreen Plus es una herramienta de gestión energética basada en Windows.

Este trabajo se centrará en RETScreen 4, desarrollado para el análisis de viabilidad de proyectos de energías limpias, incluidas las tecnologías de eficiencia energética y sistemas de energía renovable (eólica, minihidráulica, fotovoltaica, calefacción solar pasiva, bomba de calor, etc.). El software está diseñado en Excel y en el, los usuarios pueden seleccionar cada proyecto de energía de acuerdo con la finalidad de su estudio de viabilidad.

2.5.2. Clasificación

De acuerdo a la clasificación con la que se viene trabajando, podemos clasificar el modelo RETScreen de acuerdo a la tabla 9.

2.5.3. Estructura

El funcionamiento básico del modelo es la comparación entre un caso base (generalmente tecnologías energéticas convencionales), y un caso propuesto (tecnologías energéticas limpias). Para ambos casos se analiza el mismo suministro de energía, para posteriormente comparar los costes asociados a estas tecnologías y la emisión de gases de efecto invernadero.

Generalmente los costes iniciales del caso propuesto serán más altos que los del caso base, mientras que los costes anuales serán menores. La tarea de RETScreen es determinar si existe un equilibrio entre costes y ahorros durante la vida del proyecto para hacer una propuesta económicamente atractiva, reflejada en los flujos de caja y en los distintos indicadores financieros.

Propósito	General: explorar. Específico: suministro de energía, especialmente diseñado para tecnologías de energías renovables.
Estructura	Descripción muy detallada de las tecnologías de suministro energético para la expansión de la generación.
Tratamiento analítico	Abajo-arriba.
Metodología básica	Hoja de cálculo.
Enfoque matemático	No disponible.
Alcance geográfico	Local, nacional, regional y global.
Cobertura sectorial	Sector energético
Horizonte temporal	Largo plazo (más de 50 años), en plazos mensuales o anuales.
Requerimiento de datos	Cuantitativos, monetarios, desagregados.

Tabla 9: Clasificación modelo RETScreen

El análisis de reducción de gases de efecto invernadero sigue la misma estructura: se analizan las emisiones del caso base y del caso propuesto, y posteriormente se analizan las reducciones de gases de efecto invernadero.

Para realizar dicho análisis, el software sigue 5 pasos para realizar el proceso. [CETC \(2005\)](#)

1. Modelo energético: el usuario especifica los parámetros que describen la ubicación del proyecto, la tecnología que se utilizan en el caso base y en el caso propuesto, las cargas y la fuentes de energía renovable.
2. Análisis de costes: en este paso, el usuario introduce los costes iniciales, anuales y periódicos para el caso propuesto (como alternativa, el usuario puede introducir directamente los costes incrementales). El usuario tiene la opción de realizar un estudio de viabilidad o de pre-viabilidad, que requiere de información menos detallada y precisa.
3. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero: ayuda a determinar la reducción anual de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del uso de la tecnología propuesta en lugar de la tecnología del caso base. El usuario tiene la opción de realizar un análisis simplificado, estándar o personalizado.
4. Análisis financiero: el usuario especifica los parámetros financieros relacionados con el costo evitado de energía, créditos de reducción de emisiones de GEI, incentivos, inflación, la tasa de descuento, la deuda y los impuestos. A partir de esto, RETScreen calcula una variedad de indicadores financieros para evaluar la viabilidad del proyecto.
5. Análisis de riesgo y sensibilidad: opcional, ayuda al usuario a determinar cómo la incertidumbre en las estimaciones de varios parámetros clave puede afectar la viabilidad financiera del proyecto. El usuario puede realizar un análisis de sensibilidad, un análisis de riesgos, o ambos.

A continuación se muestra la estructura de RETScreen, figura 17, extraída del texto ?, donde se muestra las diferentes etapas que sigue el software.

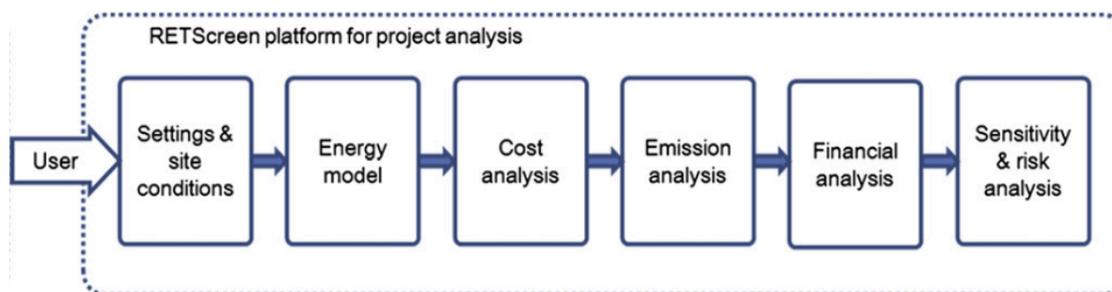


Figura 17: Etapas del proceso de análisis de RETScreen

2.5.4. Interfaz de usuario

Como se ha comentado, RETScreen está diseñado en Excel, por lo que la interfaz de usuario es una hoja de cálculo que sigue el mismo esquema que la estructura de 5 pasos vista en el párrafo anterior:

Una primera hoja de cálculo en la que selecciona el tipo de proyecto, su ubicación, el tipo de análisis, etc. En la figura 18 se muestra una captura de pantalla de esta primera hoja de cálculo.

Clean Energy Project Analysis Software

Project information [See project database](#)

Project name

Project location

Prepared for

Prepared by

Project type

Facility type

Analysis type

Heating value reference

Show settings

Site reference conditions [Select climate data location](#)

Climate data location

Show data

NASA UNEP GEF reeep [Complete Energy Model sheet](#)

Figura 18: Primera hoja de cálculo del modelo RETScreen.

En la siguiente hoja de cálculo, en el primer apartado se seleccionan los tipos de combustible a emplear, su coste, las temperaturas de calefacción y refrigeración y la programación semanal, figura 19.

Fuels & schedules		Show data					
Fuel		Fuel type 1	Fuel type 2	Fuel type 3	Fuel type 4	Fuel type 5	Fuel type 6
Fuel type		Electricity	Biomass	Gasoline - gal	Coal		
Fuel consumption - unit		MWh	t	gal	t		
Fuel rate - unit		\$/kWh	\$/t	\$/gal	\$/t		
Fuel rate		0,100	12,000	13,000	14,000		
Schedule		Schedule 1	Schedule 2	Schedule 3	Schedule 4	Schedule 5	Schedule 6
Description	Unit	24/7	2	3	4	5	6
Temperature - space heating	°C	20.0	Occupied	Occupied	Occupied	Occupied	Occupied
Temperature - space cooling	°C	18.0	22.0	34.0	40.0		
Temperature - unoccupied	+/-°C		17.0	12.0	10.0		
Occupancy rate - daily	h/d		Unoccupied	Unoccupied	Unoccupied		
Monday	24		16.0	15.0			
Tuesday	24		Occupied	Occupied	Occupied		
Wednesday	24		12.0	12.0	6.0		
Thursday	24		13.0	11.0	7.0		
Friday	24		14.0	11.0	6.0		
Saturday	24		12.0	11.0	8.0		
Sunday	24		12.0	11.0	6.0		
Occupancy rate - annual	h/yr	8,760	4,484	4,119	2,399		
	%	100%	51%	47%	27%		
Heating/cooling changeover temperature	°C						
Length of heating season	d						
Length of cooling season	d						

Figura 19: Primer apartado de la segunda hoja de cálculo de RETScreen

En esta misma hoja de cálculo, continúan las características de las instalaciones, donde se introduce el equipamiento eléctrico, los sistemas de calefacción y refrigeración, motores, bombas, pérdidas de vapor, recuperación de energía, etc. Con los datos introducidos el software calcula para el caso base y el caso propuesto los consumos, el incremento de costes, el ahorro de combustibles, el ahorro en los costes de operación y mantenimiento y el payback simple, figura 20.

Facility characteristics		Show data						
Show:	Heating	Cooling	Electricity	Incremental initial costs	Fuel cost savings	Incremental O&M savings	Simple payback	Include measure?
	MWh	MWh	MWh	\$	\$	\$	yr	<input type="checkbox"/>
Fuel consumption - proposed case								
Heating system								
Cooling system								
Building envelope								
Ventilation								
Lights								
Electrical equipment								
Hot water								
Pumps								
Fans								
Motors								
Process electricity								
Process heat								
Process steam								
Steam losses								
Heat recovery								
Compressed air								
Refrigeration								
Other								
Total	0	0	0	0	0	0		

Figura 20: Segundo apartado de la segunda hoja de cálculo de RETScreen

El siguiente apartado es un sumario, donde se recogen los datos y resultados obtenidos por el programa: coste y consumo de cada tipo de combustible seleccionado, para el caso base y el caso propuesto y el combustible y costes ahorrados, figura 21.

La hoja continúa con el análisis de emisiones, donde se especifica para cada uno de los casos analizados las emisiones de CO₂, la reducción neta anual, la cuota de transacción de créditos de GEI y los ingresos por la reducción de dichos gases, figura 22.

Por último, la hoja de cálculo concluye con el análisis financiero, donde se introduce el ratio de inflación, los años de vida del proyecto, el ratio de deuda, los incentivos y ventajas, y el

Summary		Show data							
		Fuel		Base case		Proposed case		Fuel cost savings	
Fuel type	Fuel consumption - unit	Fuel rate	Fuel consumption	Fuel cost	Fuel consumption	Fuel cost	Fuel saved	Fuel cost savings	
Project verification		Fuel consumption - unit	Fuel consumption - historical	Fuel consumption - Base case	Fuel consumption - variance				
Fuel type	Heating MWh	Cooling MWh	Electricity MWh	Total MWh					
Fuel consumption - base case				0					
Fuel consumption - proposed case				0					
Fuel saved				0					
Fuel saved - %									
Benchmark		MWh							
Energy unit	m ²								
Reference unit									

Figura 21: Tercer apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen

Emission Analysis							
GHG emission							
Base case	ICO2	0,0					
Proposed case	ICO2	0,0					
Gross annual GHG emission reduction							
GHG credits transaction fee	%						
Net annual GHG emission reduction	ICO2	0,0	is equivalent to	0,0	ICO2		
GHG reduction income							
GHG reduction credit rate	\$/ICO2						

Figura 22: Cuarto apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen

software calcula los ahorros y beneficios y realiza un análisis financiero de viabilidad, figura 23.

Financial Analysis			
Financial parameters			
Inflation rate	%		
Project life	yr		
Debt ratio	%		
Initial costs			
Energy efficiency measures	\$	0	
Other	\$		
Total initial costs	\$	0	0,0%
Incentives and grants	\$		
Annual costs and debt payments			
O&M (savings) costs	\$	0	
Fuel cost - proposed case	\$	0	
Other	\$		
Total annual costs	\$	0	
Annual savings and income			
Fuel cost - base case	\$	0	
Other	\$		
Total annual savings and income	\$	0	
Financial viability			
Pre-tax IRR - assets	%		
Simple payback	yr		
Equity payback	yr		

Cumulative cash flows graph

Figura 23: Ultimo apartado de la segunda hoja de calculo de RETScreen

2.5.5. Ejemplo de uso

Como ejemplo de uso para el modelo RETScreen se ha seleccionado un estudio realizado por la Universidad Islámica de Azud de Teheran (Irán), que realiza un estudio de viabilidad medioambiental, técnica y financiera de las plantas de energía solar en este país analizando tres escenarios, ?:

- En el primer caso, el precio de la electricidad se establece en 3,75 centavos/kWh y no se asigna ningún crédito para la reducción de gases de efecto invernadero.
- En el segundo caso, el precio de la electricidad se establece en 17,5 centavos/kWh en base a la ley de subvenciones.

- En el último escenario se incluye un crédito para la reducción de gases de efecto invernadero de 30 dólares/tonelada y los precios de la electricidad son 17,5 centavos/kWh. Además, para este escenario se incluye el uso de baterías.

Los resultados del estudio concluyen que el tercer escenario es el que requeriría un menor tiempo para obtener un flujo de caja positivo (6 años, frente a más de 12 en el primero y más de 8 en el segundo).

En la siguiente gráfica se muestra el flujo de caja acumulada para el tercer escenario analizado, figura 24.

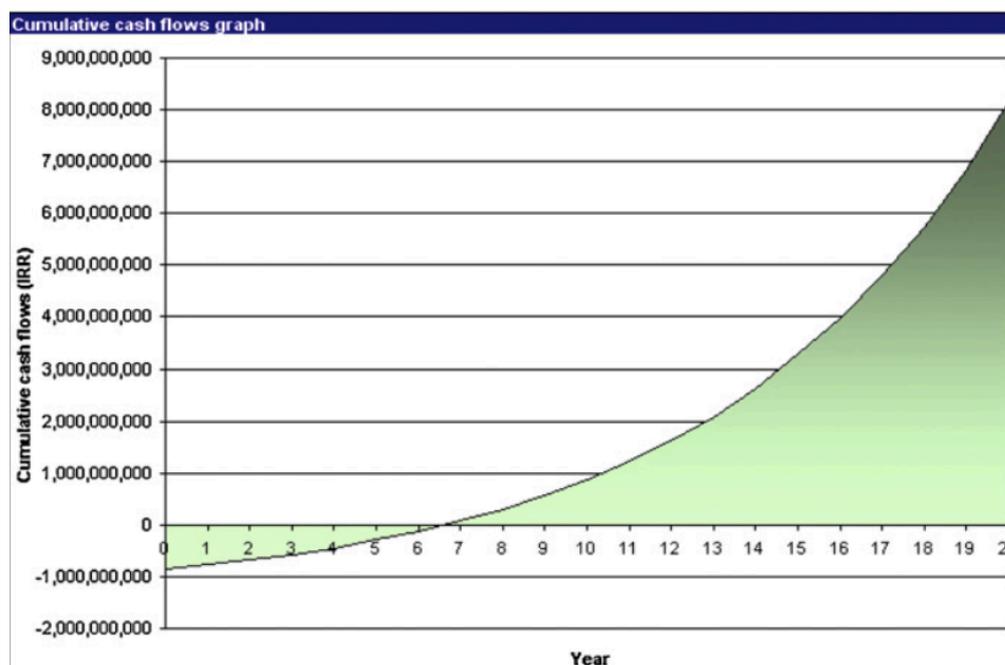


Figura 24: Flujo de caja acumulado para el tercer escenario analizado

2.5.6. Análisis de variables

En la tabla 10 se muestra un listado de las variables empleadas por RETScreen para analizar la viabilidad de proyectos.

Variable	Descripción	Unidades
Consumo energético residencial	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	MWh, litros, GJ, m3
Consumo energético industrial	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	MWh, litros, GJ, m3
Consumo energético sector servicios	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	MWh, litros, GJ, m3
Consumo energético sector transporte	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	MWh, litros, GJ, m3
Otros usos energéticos	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	MWh, litros, GJ, m3
Precio del recurso energético	Electricidad, diésel, gasolina, keroseno, carbón y biomasa	/MWh, /litros, /GJ, /m3
Planificación semanal del consumo	Planificación diaria	h/día
Temperatura de calefacción	Temperatura de calefacción en el local	°C
Temperatura de refrigeración	Temperatura de refrigeración en el local	°C
Cambio de temperatura calefacción	Cambio de temperatura calefacción	°C
Duración de la temporada de calefacción	Días de uso de la calefacción	Días
Duración de la temporada de refrigeración	Días de uso de la refrigeración	Días
Cuota de transacción de créditos de GEI	Cuota de transacción de créditos de GEI	%
Tasa de crédito de reducción de GEI	Tasa de crédito de reducción de GEI	\$/tCO2
Tasa de inflación	Tasa de inflación	%
Vida del proyecto	Años de vida del proyecto	Años

Ratio de deuda	Ratio de deuda	%
Otros costes iniciales	Otros costes iniciales	\$
Otros costes de O&M	Otros costes de O&M	\$
Otros ingresos anuales	Otros ingresos anuales	\$

Tabla 10: Variables contenidas en el modelo RETScreen

2.6. Crítica a los modelos dinámicos tradicionales

Como primer paso de cara a construir una crítica adecuada a este modelo energético, se ha considerado necesario resaltar las virtudes de los modelos tradicionales. Son modelos dinámicos que llevan años de desarrollo, cuentan con bases de datos muy completas y proporcionan resultados muy interesantes. El modelo LEAP permite además la inclusión de variables y seleccionar como se relacionan con el resto de variables del modelo. WoLiM es el único de los modelos analizados que tiene en cuenta el límite de recursos en el sistema energético, por lo que da un nuevo aporte a los modelos dinámicos. RETScreen tiene una base de datos de tecnologías energéticas muy completa (posiblemente la más completa de los modelos analizados). TIMES es el modelo más antiguo y el más empleado de los analizados, se ha utilizado en numerosos estudios tanto gubernamentales como privados. El modelo PRIMES tiene un enfoque muy interesante en la búsqueda de equilibrio en los precios de mercado, que aporta un enfoque diferente al modelado energético.

En cuanto a las críticas, si desglosamos lo que a juicio personal debería ser un modelo energético completo, este debería abarcar al menos cuatro factores interrelacionados: el factor económico, el tecnológico, el ecológico y el social.

En el factor económico, la variable principal con la que trabajan los modelos tradicionales es el producto interior bruto, sin embargo, este parámetro no representa adecuadamente la economía de una población. Un PIB alto no necesariamente indica que una economía sea saludable. Es más, no habla de la prosperidad de una población. No indica si todos los ciudadanos gozan de una buena sanidad o educación. Tampoco que porcentaje está empleado y cual carece de una oportunidad en el mercado laboral, que porcentaje dispone de un hogar en el que vivir o cuantas personas carecen de este. Sería deseable que un modelo energético completo (pese a su dificultad inherente) incluyera estos parámetros y otros muchos que definieran con una mejor precisión el estado económico real de la población de un territorio, si el objetivo de este modelo fuera precisamente el modelar un escenario energético que mejorare la economía de un área geográfica.

En cuanto al factor tecnológico, se podría profundizar más en las tecnologías de producción de energía: los modelos analizados prioriza el coste económico de cada una de las tecnologías (a excepción de WoLiM) de cara a reducir este, pero el coste económico engloba muchos otros factores además del coste de fabricación y producción. Además, no trata el espacio que emplean determinadas tecnologías, como la solar, que requiere de grandes superficies para la producción de energía a gran escala, o el conflicto por el uso del suelo, ya que las zonas con buena radiación solar también son las empleadas por cultivos o por determinados ecosistemas. Lo mismo pasa con el conflicto de emplear determinados cultivos para la producción de biocombustibles, que provocan el aumento del coste de determinados alimentos. Además, consideran los sistemas de producción de energía como ilimitados, cuando estos si tienen limitaciones: principalmente de materiales (esto si lo aborda WoLiM) los menos abundantes, como las tierras raras, o incluso materiales de uso común, como el aluminio, en el que nos acercamos a su pico de producción. Por lo tanto, no se puede considerar una fuente energética como inagotable si las tecnologías para su transformación se fabrican con materiales de los que se acabará careciendo.

En lo que respecta al factor ecológico, estos modelos miden las emisiones y principales impactos medioambientales en el mejor de los casos, pero como se ha comentado en el párrafo anterior, no incluye en su base de datos el uso de elementos en riesgo de agotarse. Tampoco el uso del suelo para determinadas tecnologías, como los biocombustibles, que puede provocar el uso de tierras de determinados ecosistemas para su plantación. Tampoco el impacto ecológico que provocan determinadas tecnologías en su entorno, como los que provocan los parques eólicos offshore o la elevación de agua para construir presas hidráulicas.

En lo que concierne a los factores sociales, como se ha comentado no miden el beneficio real de emplear determinadas tecnologías energéticas además de cómo influyen en el PIB. No miden los puestos de trabajo que provoca cada tecnología, o como afectan a las poblaciones de los entornos. Si suministra energía a los ciudadanos que carecen de recursos. Tampoco si una determinada tecnología mejora la vida de la comunidad que rodea, o por el contrario deriva en perjuicios. Si provoca que los países menos desarrollados permitan alcanzar niveles de desarrollo similares al de los países más desarrollados o por el contrario agrava las diferencias entre territorios.

Si bien es muy difícil incluir estas variables dentro de un modelo energético, puesto que hay muchas que son subjetivas o de difícil medición, si se pueden emplear aproximaciones para desarrollar un modelo energético más completo y que abarque un interés más amplio que el meramente económico.

A continuación se recogen estas anotaciones en la tabla 11 con el fin de resumir la crítica realizada.

Factores	Crítica
Económicos	Representación macro-económica de la economía. No representa de manera adecuada la realidad económica de la sociedad.
Tecnológicos	Carencia en la representación de las tecnologías energéticas. No incluye el uso de suelos, la competencia de este con otros usos, el empleo de recursos finitos como los materiales o el agua.
Ecológicos	Carencias en la representación de los impactos medioambientales. No incluye el agotamiento de materiales, la pérdida de ecosistemas por el uso de tierras ni los impactos locales de las tecnologías empleadas.
Sociales	No miden los beneficios sociales, como el empleo generado, evolución de los países menos desarrollados, peligrosidad de ciertas tecnologías, etc.
Éticos	No incluyen variables que describan este factor, como la relación entre países, disminución de las desigualdades, mantenimiento de culturas, etc.

Tabla 11: Crítica a los modelos dinámicos tradicionales

3. Propuesta de un nuevo modelo energético

Como se ha visto en las críticas realizadas a los cinco modelos dinámicos analizados, estos tienen una vertiente mayoritariamente económica o tecnológica (aunque también incluyen parámetros medioambientales, como las emisiones). Sin embargo, y en base a los factores analizados (económicos, tecnológicos, medioambientales y sociales) carecen de parámetros relevantes que completen un modelo energético más integral.

En este apartado se va a proponer el desarrollo de un modelo dinámico que integre estos parámetros. Para ello se va a seguir la misma estructura que se ha seguido para analizar los modelos dinámicos tradicionales (a excepción de la interfaz de usuario y el ejemplo de uso):

- Introducción.
- Clasificación.
- Estructura.
- Análisis de variables.
- Análisis de nuevas variables.

3.1. Introducción

La propuesta del siguiente modelo dinámico surge a raíz del análisis de diversos modelos tradicionales y a la conclusión de que carecen de un enfoque más integral, ya que de forma generalizada se centran en un enfoque económico y tecnológico, en menor medida medioambiental y careciendo de parámetros sociales. Es por ello que en el presente Trabajo Fin de Master se pretende desarrollar las bases de lo que sería un modelo dinámico más integral. Para lograrlo, el modelo se apoya en las estructuras y variables de los modelos analizados e incluye 18 nuevas variables y sus respectivas relaciones.

■ Objetivos

Los objetivos del presente modelo son, por un lado, generar un escenario energético a partir de una estrategia energética lo más realista posible, afectado por un conjunto de limitaciones (como pueden ser el agotamiento de recursos) y restricciones (como la limitación de las emisiones contaminantes, la no permisión de la pobreza energética o del uso del recurso nuclear), éstas últimas a elección del usuario.

El segundo objetivo es, que en caso de no poder generar un escenario energético debido a su inviabilidad, el modelo detalle los motivos y proponga alternativas a la estrategia energética (y/o socio económica) para su posible cumplimiento. Por ejemplo, la incapacidad de satisfacer una determinada demanda energética exclusivamente con energías verdes se puede abordar mediante diversas vertientes que provocan esa situación: tecnológica (generar más energía empleando tecnologías tradicionales o desarrollando nuevas como la fusión nuclear) o socioeconómicas (disminuyendo la demanda, determinada por el tamaño de la población y el consumo per capita).

3.2. Clasificación

En este apartado se establece la clasificación del nuevo modelo dinámico, tabla 3.2.

Propósito	General: explorar el futuro. Específico: evalúa las alternativas posibles y en caso de que sean viables, selecciona la mas adecuada en función de los parámetros escogidos por el usuario.
Estructura	Grado alto de endogenización en el modulo <i>escenario base</i> . Descripción simple de los usos finales de la energía, desglosado por sectores económicos. Descripción detallada de las fuentes de suministro de energía, incluidos los recursos necesarios para cada tipo de tecnología energética.
Tratamiento analítico	Tratamiento híbrido, el análisis de la demanda sigue un tratamiento de arriba-abajo. El suministro en cambio tiene un enfoque de abajo-arriba.
Metodología básica	Modelo multicriterio. La demanda sigue una metodología econométrica. El suministro de energía sigue una metodología de simulación y optimización.
Alcance geográfico	Local, nacional, regional y global.
Cobertura sectorial	Todos los sectores, incluyendo sector transporte, residencial, industrial, comercial y otros usos de la energía.
Horizonte temporal	Medio-largo plazo.

Tabla 12: Clasificación del modelo propuesto

3.3. Estructura

Para el desarrollo de la estructura el modelo se basa en la estructura por módulos o carpetas que emplea la pestaña de análisis de LEAP. En base a esto el modelo se estructura en cinco módulos básicos interrelacionados, figura 25:

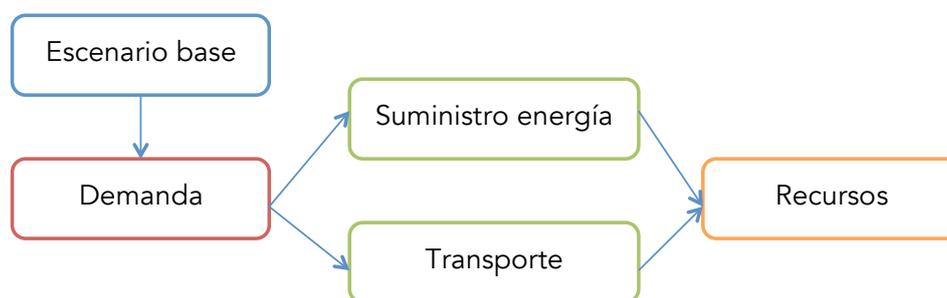


Figura 25: Relaciones principales entre los módulos del modelo

A continuación se detallan los módulos que componen la estructura del modelo propuesto. A su vez, cada módulo se divide en submódulos o carpetas:

- **Escenario base**

En este módulo, a partir de un conjunto de variables se modela un escenario socioeconómico. Las principales variables que modelan el escenario base son el PIB (I.1) que muestra los ingresos totales del área geográfica objeto de estudio, y el tamaño de la población (I.5) y su evolución. A partir de estas variables (junto a otras como la tasa de desempleo (I.8)) se genera la demanda energética y de transporte en los diferentes sectores (esto se muestra en el siguiente módulo).

Una alternativa al PIB que contempla el modelo es el llamado PIB verde o índice de riqueza inclusiva (I.2), que mide el desarrollo económico en relación a su sostenibilidad ecológica. Puede dar valores muy diferentes al PIB convencional (como ejemplo, China obtuvo valores nulos o negativos a partir de 2004 al incluir los costes ecológicos, pese a su espectacular crecimiento económico).

Una variable de sumo interés es el índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad (IDH-D) (I.4), que es la variable que emplea en el modelo para medir el índice de desarrollo real del área de estudio y que se basa en tres parámetros: salud, educación y riqueza, tomando en consideración como se distribuyen estos logros entre los ciudadanos (al contrario que el índice de desarrollo humano (IDH) que no revela las disparidades existentes entre la población).

Junto a estas variables también se han definido dentro de este módulo variables exógenas que ayudan a definir el objetivo del análisis, como son el grado de limitación de la pobreza energética (I.10) que define la cantidad mensual de energía que se suministrará a la población que carece de recursos para cubrir sus necesidades energéticas mínimas, la cuota de máxima potencia instalada de energía nuclear (I.15), que limita la participación de la energía nuclear en el mix energético, la cuota mínima de energías renovables (I.13) en este mismo mix energético, el grado de seguridad de suministro energético escogido por el usuario (I.14) o la cuota mínima de superficie forestal (I.18).

■ Demanda

En el contexto del escenario base se genera una demanda de energía (electricidad y calor) y de transporte, desarrolladas en este módulo, que a su vez se divide en submódulos siguiendo la siguiente estructura:

- Industrial
- Residencial
 - Urbano
 - Rural
- Comercial
- Transporte
 - Pasajeros
 - Mercancia

La demanda energética y de transporte de los diferentes sectores y subsectores viene determinada por las siguientes variables: el consumo de energía final per capita (II.2), la demanda energética (II.1, II.6, II.8, II.10, II.12, II.13) y el consumo por fuente y tipo de transporte (II.4).

Otra variable importante en el modelo es la intensidad energética de los diferentes sectores (II.5, II.7, II.9, II.11) que relaciona cuanta energía es necesaria para producir una unidad monetaria en la economía del área de estudio (cociente entre el consumo energético y el PIB) y que el modelo empleará como indicador de la eficiencia energética del área de estudio.

Además, en este modulo se incluyen variables que definen los costes de diferentes hidrocarburos (II.23 a II.30), y variables que determinan el consumo de agua (II.16) y materiales (II.17) de la población del área de estudio (los costes de agua y materiales derivados de la generación de energía se definen en el módulo *suministro de energía*).

■ Suministro de energía

En este modulo se incluyen las variables relacionadas con la producción y el transporte de energía, que satisfarán la demanda energética generada en el modulo *Demanda*, tanto la demanda de electricidad como la de energía térmica.

La estructura del modulo es la siguiente:

- Electricidad
 - Generación eléctrica
 - ◇ Fuentes renovables
 - ◇ Fuentes no renovables
 - Transformación

Dentro del submódulo electricidad se encuentran las variables que definen los costes de inversión tanto de las fuentes renovables (III.16) costes que decrecen con el tiempo y que hacen cada vez mas competitivas las energías renovables, como de las no renovables (III.17). También el periodo de vida para estas dos familias de tecnologías (III.12 y III.13), la electricidad producida (III.6 a III.10), las emisiones producidas (III.26), las intensidades de agua de cada tecnología (II.24 y II.25) y los materiales requeridos para su fabricación medidos en términos de exergía (III.23). Otra importante variable que en este caso afecta a las energías renovables es el factor de capacidad (III.5) que mide la relación entre la energía generada y la que generaría si hubiese estado funcionando durante ese periodo a su potencia nominal.

En cuanto al submódulo transformación incluye las variables: energía primaria consumida para producir electricidad por cada fuente (III.1), las pérdidas en el suministro (III.2) y la electricidad autoconsumida por las fuentes renovables y no renovables (III.3

y III.4) .

El submódulo energía térmica alberga variables ya definidas anteriormente como el coste de instalación de las fuentes renovables (III.16) su ciclo de vida (III.14) o su factor de capacidad (III.5) así como otras variables como el coste de energía térmica de fuentes renovables (III.18) y su producción (III.11),

■ Transporte

En este modulo se recogen las variables relacionadas en satisfacer la demanda de transporte generada en el modulo de *demanda*. Se divide en dos submódulos:

- Medios de transporte de combustión interna
- Medios de transporte alternativos
 - Vehículos eléctricos
 - Vehículos híbridos
 - Vehículos que emplean hidrógeno como combustible

En estos submódulos se incluyen el reparto de los diferentes tipos de vehículos (IV.4 a V.7), su cuota de mercado (IV.2 a IV.4), las materias primas necesarias para su fabricación (V.8), la evolución de las emisiones de los vehículos de combustión interna (IV.9) y las baterías empleadas en los coches eléctricos (IV.10 y IV.11).

■ Recursos

Es el último modulo en la estructura del modelo y recoge las variables que limitan el sistema energético. se estructura en tres subapartados:

- Limitaciones de recursos fósiles
- Limitaciones de minerales no energéticos
- Limitaciones de territorio

Dentro del primer subapartado se incluyen las variables que indican las reservas y producciones exergéticas de combustibles fósiles: petróleo, carbón y gas (V.1 a V.13). También se ha incluido la producción de biocombustibles (V.9).

En el subapartado limitaciones de materias primas se incluyen las variables relacionadas con el agotamiento de las materias primas: entre ellas la producción de los minerales conocidos como *the big six* para todos los sectores, medidos en términos de exergía (V.10), el total de recursos (V.15) y reservas (V.14).

Diagramas de relaciones

A continuación, con objeto de clarificar la estructura y el funcionamiento del modelo, se muestran una serie de diagramas en los que se indican las relaciones entre las distintas va-

riables del modelo.

En los primeros diagramas se muestran mediante flechas las relaciones entre las variables de cada uno de los módulos que se han descrito. Los recuadros con el borde negro representan el resto de los módulos, que se consideran cajas negras donde no se muestran las relaciones con las variables de estos últimos. Esto se ha enfocado así con el objetivo de que no resulte confuso seguir las relaciones que guardan las variables. Mas adelante se desarrollan las relaciones principales entre variables de distintos módulos.

Los recuadros con borde continuo indican que se tratan de variables endógenas, mientras que si el trazo es discontinuo se tratan de variables exógenas.

Si el fondo de los recuadros es blanco se tratan de variables extraídas de otros modelos, mientras que si esta coloreado con un tono mas claro que el del borde se tratan de variables aportadas por este TFM.

El primer diagrama que se muestra representa las relaciones entre las variables del modulo *escenario base*, figura 26, que como se ha explicado antes y su nombre indica, genera un escenario de partida para el modelo dinámico.

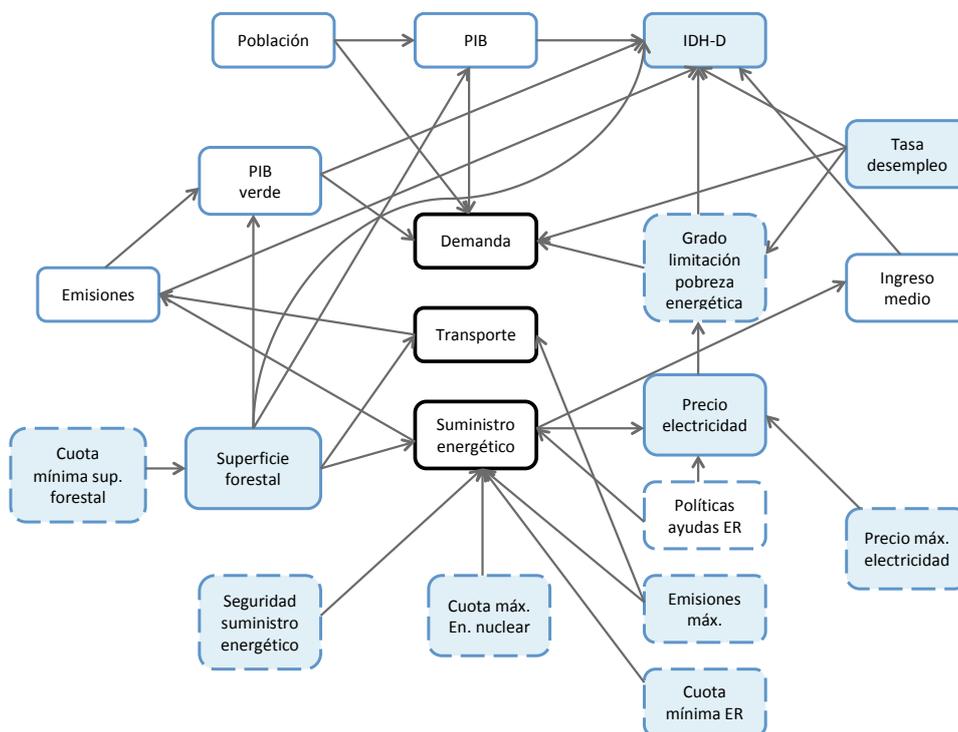


Figura 26: Relaciones principales entre las variables del modulo escenario base

Analizando el diagrama, se aprecia que la población y el PIB influyen directamente en el modulo *demanda*, se hecho, son las variables que más influencia tienen sobre la demanda energética: un aumento de la población y/o del PIB provocan una subida de la demanda de energía. Este parámetro también se ve afectado por la tasa de desempleo y el grado de

limitación de la pobreza energética: si en el modelo se contempla que todas las personas, incluidas las que carecen de recursos, tienen un suministro mínimo de energía, provocará un aumento de la demanda de energía. Esto tiene una doble repercusión, por un lado como se ha comentado aumenta la demanda de energía con todo lo que conlleva (aumento de las emisiones, agotamiento de recursos), pero por otro lado aumenta el IDH-D.

Siguiendo con este parámetro, el IDH-D se ve afectado por seis variables: el grado de limitación de la pobreza energética, el ingreso medio, la tasa de desempleo, el PIB y el PIB verde afectan al IDH-D en sus variables que tratan la riqueza y la desigualdad. Las emisiones afectan a este índice mediante su indicador de la salud.

El módulo *suministro energético* se ve influenciado por seis variables: la seguridad en el suministro energético (que en función del valor escogido afectará al mix energético, ya que no todas las tecnologías tienen el mismo grado de seguridad de suministro), la cuota máxima de energía nuclear, la cuota mínima de energías renovables, las políticas de ayudas a las energías renovables, las emisiones máximas permitidas y la cuota mínima de superficie forestal (que puede limitar el espacio dedicado a las tecnologías solares y a la biomasa).

Estas dos últimas variables afectan además al módulo *transporte*, las emisiones máximas permitidas y la cuota mínima de superficie forestal, que puede afectar a los cultivos de biocombustibles.

Ambos módulos, *transporte* y *suministro energético*, determinan el valor de la variable emisiones, que además de guardar relación con el IDH-D influye de manera determinante en el PIB verde, ya que como se ha comentado incluye en su análisis el coste ecológico.

La variable superficie forestal guarda además relación directa con el PIB y la tasa de desempleo, aumentando ambas como se desarrolla en [OCDE \(2008\)](#).

El siguiente diagrama corresponde al módulo demanda, figura 27:

Se puede apreciar que del módulo *escenario base* surgen tres tipos de demanda: demanda de energía, de transporte y de agua y materiales, que se enlazan con sus respectivos módulos.

Con el módulo suministro energético se conecta mediante las variables consumo energético del sector industrial, residencial, transporte y otros sectores, que junto a las variables demanda de electricidad, demanda energética del reciclaje y la demanda energética de la extracción de minerales definen la demanda energética total (de electricidad, calor, productos energéticos) del sistema analizado. Si las variables que relacionan el módulo *escenario energético* con el de *demanda* (como el PIB o la población) aumentan, aumentará proporcionalmente el consumo energético, que repercutirá en el siguiente módulo *suministro energético*.

A partir de las variables transporte de personas y transporte de mercancías se define la demanda de transporte, que se modelara a partir del modulo *transporte*.

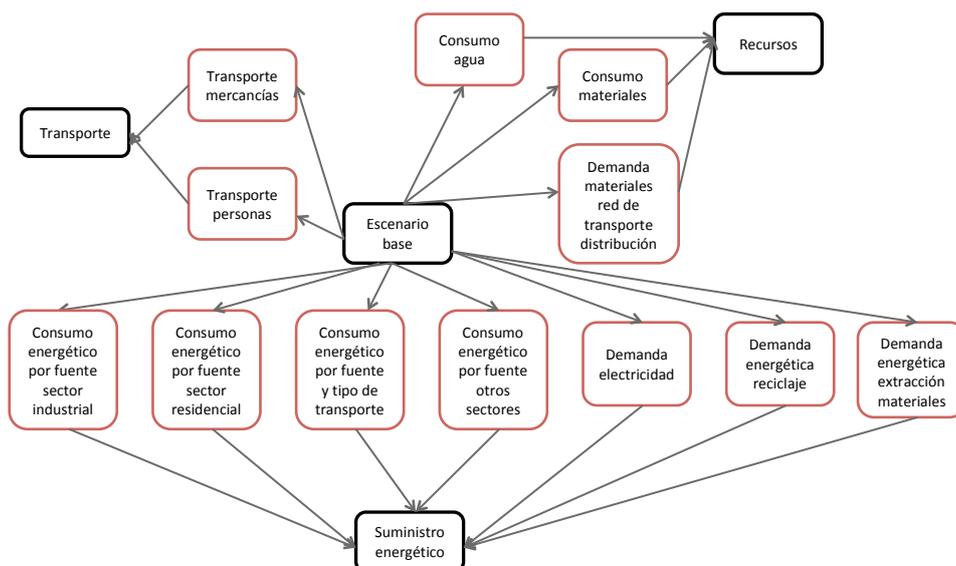


Figura 27: Relaciones principales entre las variables del módulo demanda

Por último, el escenario energético genera una demanda de agua y materiales anual para cada persona, que se satisfará a través del módulo *recursos*.

Como se ha comentado al principio del subcapítulo, el módulo *demanda* genera una demanda de energía que se satisface a través del módulo *suministro de energía*. El diagrama de la figura 28 muestra las relaciones principales de este módulo y su relación con el siguiente módulo, *recursos*.

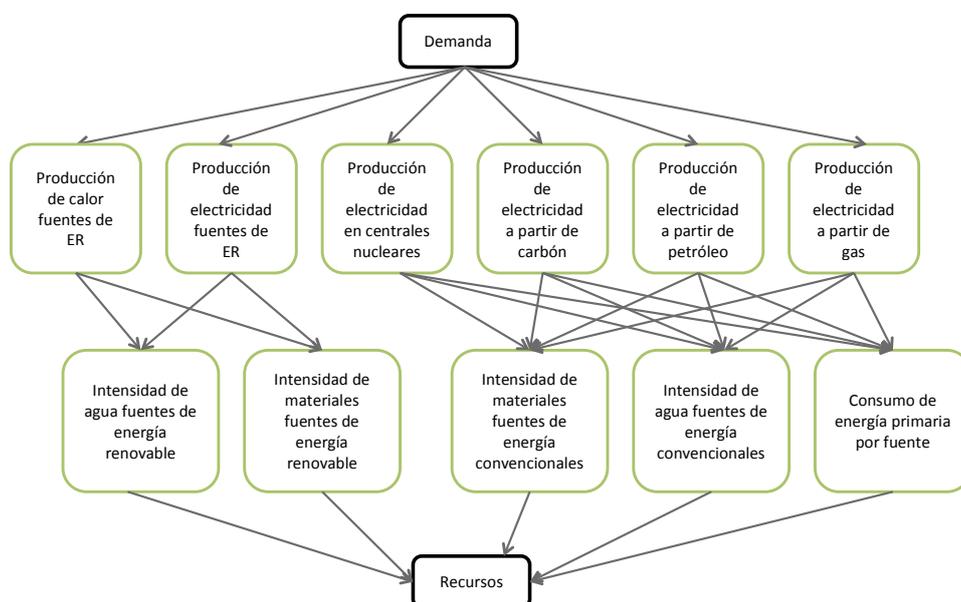


Figura 28: Relaciones principales entre las variables del módulo suministro de energía

Como se muestra en el diagrama, el módulo *demanda* genera dos necesidades energéticas básicas, calor y electricidad. El calor se suministra a través de fuentes de energía renovables. La demanda de energía se cubre tanto de fuentes de energía renovables como de fuentes de

energía convencionales.

Ambos tipos de fuentes de energía , renovables y convencionales, requieren de una determinada cantidad de materiales, determinada respectivamente mediante la intensidad de materiales de fuentes de energía renovables y la intensidad de materiales de fuentes de energía convencionales. Estos requerimientos de materiales se satisfacen a través de las variables del modulo recursos, con las que están enlazadas.

En la figura 29 se representa en relación a la estructura básica del modelo es el que representa las variables del modulo *transportes*, que a su vez se enlaza con los módulos *demanda* y *recursos*.

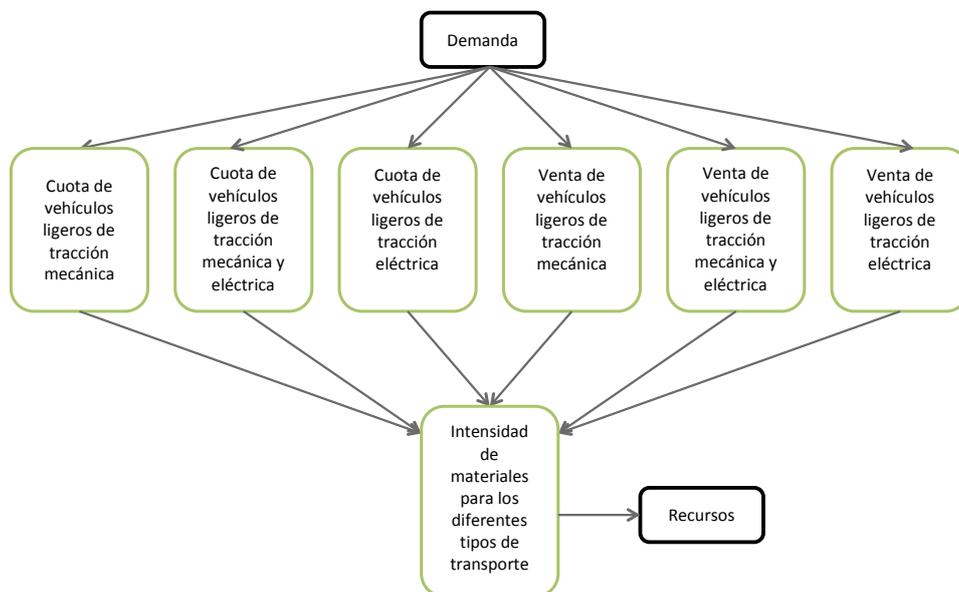


Figura 29: Relaciones principales entre las variables del modulo transporte

Similar al diagrama precedente, se cubre la necesidad de demanda de transporte del módulo demanda mediante la cuota de los diferentes tipos de transporte en función de su tracción (eléctrica, mecánica o híbrida) y la cuota de ventas de estos mismos tipos de vehículos.

A su vez, estos vehículos generan una demanda de materiales para su fabricación, modelada a través de la variable intensidad de materiales para el transporte, que a su vez se enlaza con el modulo *recursos*, cuyas variables deberán proveer dichos materiales.

En el último módulo del modelo, *recursos*, se satisfacen las necesidades de materiales, espacio e hídricas del sistema energético y de transporte, que se relacionan a través de los módulos *escenario base* y *transporte*, figura 30.

De los módulos *escenario base* y *transporte* se demanda una producción de petróleo, gas, carbón y minerales, que se satisfacen mediante la producción de dichas materias primas y sus ratios de reciclaje. A su vez, su producción se satisface a través de las variables reservas de petróleo, gas, carbón y metales, que finalmente se enlazan con la variable recursos totales. A su vez, la demanda de agua se satisface a través de la variable reservas de agua.

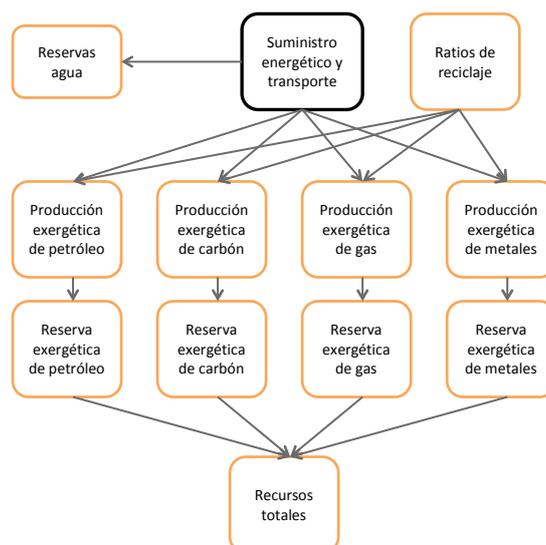


Figura 30: Relaciones principales entre las variables del módulo recursos

En la figura 31, se muestra un diagrama que relaciona las variables de todo el sistema eléctrico, desde el *escenario base* al de *recursos*.

Se aprecia que a través de las variables PIB/PIB verde, población, tasa de desempleo y pobreza energética del módulo *escenario base* se genera una demanda de energía en los sectores industrial, residencial, transporte y otros sectores del módulo *demanda*.

Esta demanda de electricidad se satisface mediante su producción a partir de fuentes renovables, de fuentes fósiles y de centrales nucleares, del módulo *suministro de energía*. Se ve condicionado por dos variables, la cuota mínima de energías renovables y la cuota máxima de energía nuclear. En este punto se producen dos realimentaciones interesantes: por un lado, el mix eléctrico del escenario energético produce electricidad a un precio determinado. Este coste se compara con el precio máximo de electricidad seleccionado por el usuario y en caso de que se sobrepase se manda la orden al módulo para que modifique el mix eléctrico con el objetivo de bajar el precio de la electricidad. Algo similar ocurre con las emisiones, se compara las emisiones del escenario y se comparan con las máximas posibles introducidas por el modelo, y se realimenta la información hasta que el modelo cumpla la condición. Ambas cumpliendo con las restricciones impuestas por el usuario (mínimo de renovables y máximo de nuclear).

En la parte inferior del diagrama la electricidad producida por las diferentes tecnologías demanda una cantidad de materiales y agua, que se satisface a través del módulo *recursos*. De nuevo esta información se realimenta debido a que si se diera el caso de la imposibilidad de satisfacer las necesidades de materiales o agua del escenario propuesto, se modifique el mix eléctrico en el módulo *suministro de energía*.

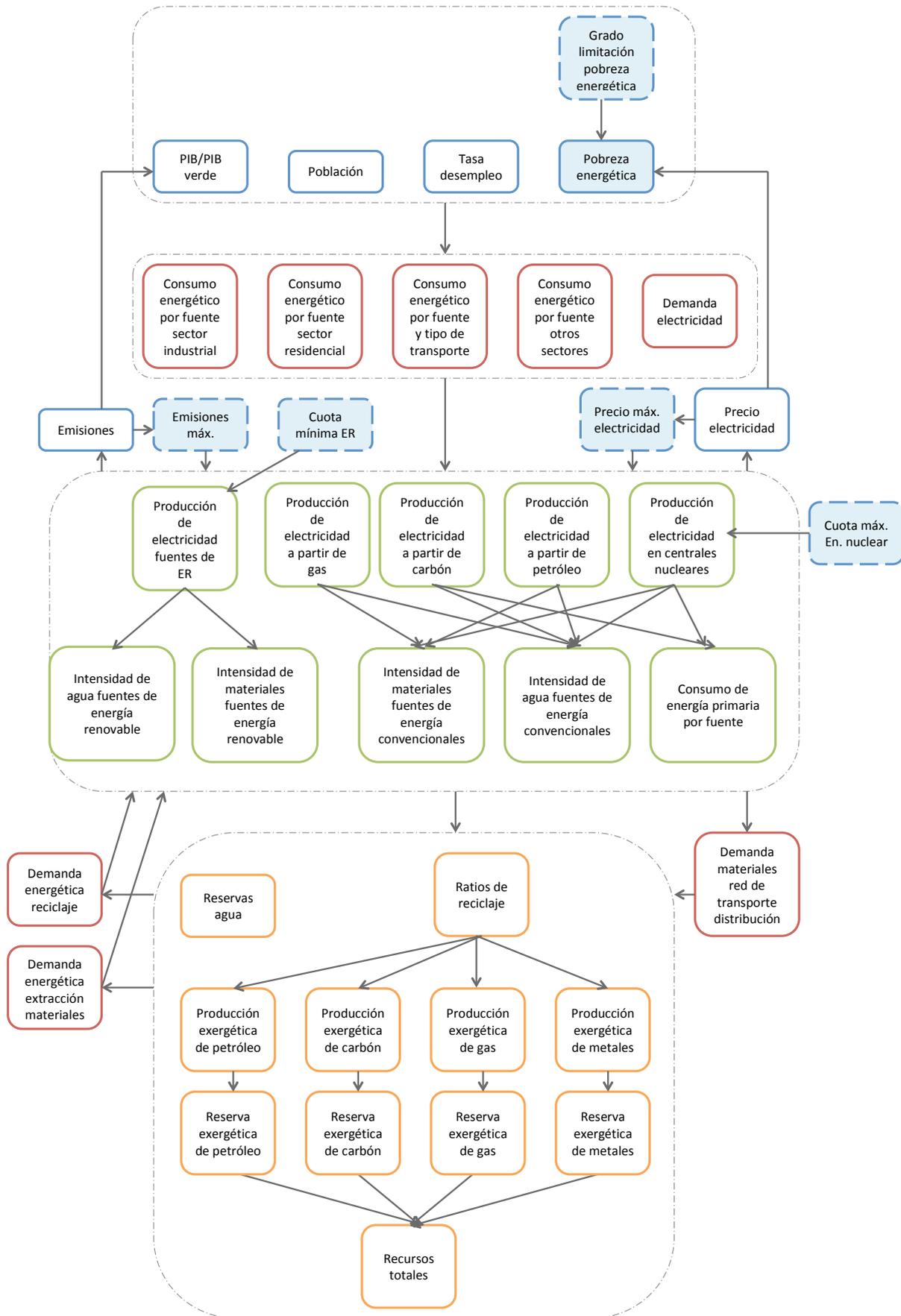


Figura 31: Relaciones principales entre las variables del sistema eléctrico

3.4. Análisis de variables

En este apartado se incluyen tablas con las variables empleadas en el modelo, una breve descripción de estas y las fuentes de donde se extraen los datos, agrupadas en los cinco módulos desarrollados en el proyecto.

La tabla 13 corresponde al módulo *escenario base*, que contiene 18 variables:

Variab	Nombre	Descripción	Fuente
I.1	Índice de riqueza inclusiva o PIB	Basado en el poder adquisitivo estándar	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=SNA_TABLE1
I.2	PIB verde	Desarrollo económico respecto de su sostenibilidad	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=GREEN_GROWTH
I.3	Ingreso medio	Relaciona la intensidad energética con los ingresos medios	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IDD
I.4	Índice de desarrollo humano ajustado por desigualdades	Indica el desarrollo humano de un país teniendo en consideración su distribución en la población	http://hdr.undp.org/en/composite/IHDI
I.5	Población	Habitantes de un área geográfica	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators
I.6	Población urbana	Habitantes que viven en un área urbana	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators
I.7	Población rural	Habitantes que viven en un área rural	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators
I.8	Tasa de desempleo	Porcentaje de la población que carece de empleo	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators
I.9	Pobreza energética	Porcentaje de la población que carece de recursos mínimos	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IDD
I.10	Grado de limitación de la pobreza energética	Define si se permite la pobreza energética o por el contrario se garantiza un suministro mínimo a toda la población	Variable definida por el usuario
I.11	Precio máximo electricidad	Precio máximo de la electricidad en el mercado eléctrico	Variable definida por el usuario
I.12	Emisiones de CO2 máximas	Máximas emisiones permitidas de CO2	Variable definida por el usuario
I.13	Cuota mínima ER	Cuota mínima de electricidad generada mediante ER	Variable definida por el usuario
I.14	Grado de seguridad de suministro energético	Grado de seguridad de suministro energético	Variable definida por el usuario
I.15	Cuota máxima de energía nuclear	Porcentaje máximo de electricidad generada mediante energía nuclear	Variable definida por el usuario
I.16	Primas a las renovables	Políticas de ayudas a las energías renovables	Variable definida por el usuario
I.17	Superficie forestal	Superficie forestal del área de estudio	http://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS
I.18	Cuota mínima de superficie forestal	territorio mínimo respecto del total protegido como superficie forestal	Variable definida por el usuario

Tabla 13: Variables contenidas en el módulo escenario base

La tabla 14 corresponde al módulo *demanda*, con 31 variables:

Variab	Nombre	Descripción	Fuente
II.1	Demanda de electricidad	Demanda eléctrica final anual	http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/

II.2	Consumo de energía final per capita	Medida de la cantidad de energía final consumida anualmente por una persona	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
II.3	Intensidad energética	Medida de la cantidad de energía necesaria para producir una unidad monetaria	http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=world-development-indicators
II.4	Consumo de energía final por fuente y tipo de transporte	Cuota de consumo energético anual del sector transporte por subsectores (carretera, aviación, marítimo, tren) y tipo de energía final (carbón, petróleo, gas, electricidad, biocombustibles)	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
II.5	Intensidad energética del sector transporte	Energía necesaria en el sector transporte para contribuir al VAB	http://www.worldenergy.org/data/
II.6	Consumo de energía final del sector industrial por tipo de energía final	Cantidad de energía consumida a partir de fuentes de energía renovables, electricidad, productos derivados del petróleo, gas y combustibles líquidos	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
II.7	Intensidad energética del sector industrial	Energía necesaria en el sector industrial para contribuir al VAB	http://www.worldenergy.org/data/
II.8	Consumo de energía final del sector residencial por tipo de energía final	Cantidad de energía consumida a partir de fuentes de energía renovables, electricidad, productos derivados del petróleo, gas y combustibles líquidos	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
II.9	Intensidad energética del sector residencial	Energía necesaria en el sector residencial para contribuir al VAB	http://www.worldenergy.org/data/
II.10	Consumo de energía final de otros sectores por tipo de energía final	Cantidad de energía consumida a partir de fuentes de energía renovables, electricidad, productos derivados del petróleo, gas y combustibles líquidos	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
II.11	Intensidad energética de otros sectores	Energía necesaria en otros sectores para contribuir al VAB	http://www.worldenergy.org/data/
II.12	Demanda energética de reciclaje	Cantidad de energía requerida para reciclar materiales comparado con la exergía de los materiales	Grimes et al (2008, 2016).
II.13	Demanda energética de la extracción de materiales	Cantidad de energía requerida para extraer materiales medida en términos de exergía	Valero and Valero (2014)
II.14	Transporte de personas	Mide cuantos kilómetros son recorridos por todas las personas en diferentes medios de transporte (carretera, tren, marítimos y aviación)	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DatasetCode=SNA_TABLE1 http://www.emta.com/spip.php?article267&lang=en http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
II.15	Transporte de mercancías	Mide cuantos kilómetros son recorridos por todas las mercancías en diferentes medios de transporte (carretera, tren, marítimos y aviación)	http://stats.oecd.org/Index.aspx?DatasetCode=SNA_TABLE1 http://www.emta.com/spip.php?article267&lang=en http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
II.16	Consumo de agua	Medida de la cantidad de agua consumida anualmente por una persona	http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm
II.17	Consumo de materiales	Medida de la cantidad de materiales consumidos anualmente por una persona	http://www.eea.europa.eu/publications/material-resources-and-waste-2014/at_download/file
II.18	Demanda de materiales para la red de transporte y distribución	Medida de la demanda de cantidad de las redes como consecuencia del incremento de la red eléctrica en un contexto de generación distribuida	García Olivares et al. (2012)
II.19	De carbón a combustible líquido	Cantidad anual de combustibles líquidos consumidos provenientes de carbón	http://www.worldcoal.org/
II.20	Eficiencia de carbón a combustible líquido	Eficiencia en procesos de carbón a combustible	http://www.worldcoal.org/
II.21	De gas a combustible líquido	Cantidad anual de combustibles líquidos consumidos provenientes de gas	http://earlywarn.blogspot.com.es/2010/01/gas-to-liquids-production-statistics.html
II.22	Eficiencia de gas a combustible líquido	Eficiencia en procesos de gas a combustible	http://earlywarn.blogspot.com.es/2010/01/gas-to-liquids-production-statistics.html
II.23	Precio medio del gas natural para consumidores domésticos	Precio medio del gas natural para consumidores domésticos	http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
II.24	Precio medio del gas natural para consumidores industriales	Precio medio del gas natural para consumidores industriales	http://ec.europa.eu/eurostat/data/database

II.25	Precio del diesel para aplicaciones térmicas para consumidores domésticos	Precio del diesel para aplicaciones térmicas para consumidores domésticos	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.26	Precio del diesel para aplicaciones térmicas para consumidores industriales	Precio del diesel para aplicaciones térmicas para consumidores industriales	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.27	Precio del carbón para aplicaciones térmicas para consumidores domésticos	Precio del carbón para aplicaciones térmicas para consumidores domésticos	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.28	Precio del carbón para aplicaciones térmicas para consumidores industriales	Precio del carbón para aplicaciones térmicas para consumidores industriales	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.29	Precio del diesel para el transporte	Medio el coste medio del diesel para el transporte	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.30	Precio de la gasolina para el transporte	Medio el coste medio de la gasolina para el transporte	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics
II.31	Precio de los certificados de CO2	Medio el coste medio de los certificados de CO2	http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics

Tabla 14: Variables contenidas en el módulo demanda

La tabla 15 muestra las variables contenidas en el módulo *suministro de energía*.

Variab	Nombre	Descripción	Fuente
III.1	Consumo de energía primaria para producir electricidad por fuente	Consumo anual de energía primaria consumida por cada tipo de fuente en el sector eléctrico	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
III.2	Pérdidas en el suministro eléctrico	Pérdidas en la red de transporte y distribución de electricidad	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
III.3	Autoconsumo de electricidad a partir de combustibles fósiles	Mide la cantidad de electricidad que proviene de sistemas de autoconsumo que utilizan combustibles fósiles (como las plantas de cogeneración)	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
III.4	Autoconsumo de electricidad a partir de fuentes de energías renovables	Mide la cantidad de electricidad que proviene de sistemas de autoconsumo que utilizan fuentes de energías renovables (como la energía eólica)	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/
III.5	Factor de capacidad de fuentes de energía renovables	Productividad de cada tecnología no sólo de acuerdo a la evolución de la tecnología, sino también a los recursos renovables potenciales (eólica, solar fotovoltaica, solar CSP, hidráulica, biomasa para la producción de electricidad)	http://www.euroserver.org/
III.6	Producción por tecnología de fuentes de energía renovable	Producción anual de cada tecnología renovable	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=SPAIN&product=Indicators
III.7	Producción de electricidad en centrales nucleares	Producción de electricidad de centrales nucleares	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=SPAIN&product=Indicators
III.8	Producción de electricidad a partir de carbón	Producción de electricidad a partir de fuentes de carbón	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=SPAIN&product=Indicators
III.9	Producción de electricidad a partir de petróleo	Producción de electricidad de centrales de combustibles fósiles derivados del petróleo	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=SPAIN&product=Indicators
III.10	Producción de electricidad a partir de fuentes de gas	Producción de electricidad a partir de fuentes de gas	http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=SPAIN&product=Indicators

III.11	Producción de fuentes de energía renovables para aplicaciones térmicas	Producción anual de cada fuente de energía renovable para aplicaciones térmicas (geotérmica, biomasa, solar térmica)	http://www.euroobserver.org/
III.12	Tiempo de vida de fuentes de energía renovable	Tiempo de vida de cada fuente de energía renovable	http://www.euroobserver.org/
III.13	Tiempo de vida de centrales eléctricas convencionales	Costes de inversión de centrales eléctricas convencionales (carbón, nuclear, cogeneración, etc.)	http://world-nuclear.org/
III.14	Tiempo de vida de fuentes de energía renovable para aplicaciones térmicas	Tiempo de vida de fuentes de energía renovable para aplicaciones térmicas	http://www.euroobserver.org/
III.15	Costes de electricidad de fuentes de energía renovables	Coste normalizado de electricidad para cada tecnología basada en fuentes renovables (eólica, solar fotovoltaica, solar CSP, hidráulica, biomasa para la producción de electricidad)	http://www.euroobserver.org/
III.16	Costes de inversión de fuentes de energía renovables	Costes de inversión para cada tecnología basada en fuentes renovables (eólica, solar fotovoltaica, solar CSP, hidráulica, biomasa para la producción de electricidad)	http://www.euroobserver.org/
III.17	Costes de inversión de centrales eléctricas convencionales	Tiempo de vida de centrales eléctricas convencionales (carbón, nuclear, cogeneración, etc.)	http://world-nuclear.org/
III.18	Costes de energía térmica a partir de fuentes renovables	Costes normalizado de energía térmica a partir de fuentes renovables (geotérmica, biomasa, solar térmica)	http://www.euroobserver.org/
III.19	Eficiencia de centrales combustibles derivados del petróleo	Eficiencia de centrales combustibles derivados del petróleo	https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=107&t=3
III.20	Eficiencia de centrales de eléctricas de gas	Eficiencia de centrales eléctricas de gas	https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=107&t=3
III.21	Eficiencia de centrales eléctricas de carbón	Eficiencia de centrales eléctricas de carbón	https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=107&t=3
III.22	Intensidad de materiales para fuentes de energía renovables	Materiales requeridos, en términos de exergía necesitados en la fabricación de 1 MW de cada tecnología de fuentes de energía renovables	IEA, WEC, RES associations
III.23	Intensidad de materiales para fuentes de energía convencionales	Materiales requeridos, en términos de exergía necesitados en la fabricación de 1 MW de cada tecnología de fuentes de energía convencionales	IEA, WEC, RES associations
III.24	Intensidad de agua para fuentes de energía renovables	Consumo de agua requerido en la producción de 1 MWh de cada tecnología de fuentes de energía renovables	2*Agency, I. E. (2012). Water for energy. is energy becoming a thirstier resource? y Tidwell, V., y Moreland, B. (2016). Mapping water consumption for energy production around the pacific rim.
III.25	Intensidad de agua para fuentes de energía convencionales	Consumo de agua requerido en la producción de 1 MWh de cada tecnología de fuentes de energía convencional	
III.26	Emisiones del sector eléctrico	Media de emisiones de CO2 del sector eléctrico	http://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.ETOT.ZS
III.27	Almacenamiento de electricidad en relación a la generación distribuida con fuentes de energía renovable	Medida de la capacidad de almacenamiento en relación a la promoción de fuentes de energía renovables en un escenario de generación distribuida	https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf
III.28	Demanda de materiales en la red de transporte y distribución	Medida de demanda de materiales de las redes de transporte y distribución como consecuencia de un incremento de la red eléctrica en un escenario de generación distribuida	García Olivares et al. (2012)
III.29	Factor de capacidad	Factor de capacidad de cada tecnología energética	https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.cfm?t=epmt_6_07_b

Tabla 15: Variables contenidas en el módulo suministro de energía

En la tabla 16 se muestran las 11 variables contenidas en el módulo *transporte*.

Variab	Nombre	Descripción	Fuente
IV.1	Flota de vehículos ligeros de pasajeros	Número total de la flota de vehículos ligeros de pasajeros	http://www.acea.be/
IV.2	Cuota de vehículos ligeros de tracción eléctrica	Cuota de vehículos de tracción eléctrica respecto del total de vehículos	http://www.acea.be/
IV.3	Cuota de vehículos ligeros de tracción eléctrica y mecánica	Cuota de vehículos híbridos respecto del total de la flota de vehículos	http://www.acea.be/

IV4	Cuota de vehículos ligeros de tracción mecánica	Cuota de vehículos de combustión interna respecto del total de la flota de vehículos	http://www.acea.be/
IV5	Ventas de vehículos ligeros de tracción eléctrica	Ventas de vehículos eléctricos con respecto al total de ventas de vehículos	http://www.acea.be/
IV6	Ventas de vehículos ligeros de tracción eléctrica y mecánica	Ventas de vehículos híbridos con respecto al total de ventas de vehículos	http://www.acea.be/
IV7	Ventas de vehículos ligeros de tracción mecánica	Ventas de vehículos de combustión interna con respecto al total de ventas de vehículos	http://www.acea.be/
IV8	Intensidad de materiales para transporte	Materiales requeridos, en términos de exergía necesitados en la fabricación de 1 vehículo de los diferentes tipos	IEA, EMTA (European Metropolitan Transport Authorities)
IV9	Evolución de los gases de efecto invernadero de los vehículos ligeros	Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero como resultado de la evolución de la regulación para diferentes emisiones de contaminantes	http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm
IV10	Evolución de los sistemas de almacenamiento de energía para vehículos ligeros	Evolución de los sistemas de almacenamiento de energía para vehículos ligeros (NiMH y tecnologías Li-ion)	http://ewfa.org/sites/default/files/rev_of_battery_executive_web_1.pdf
IV11	Tiempo de vida de los sistemas de almacenamiento de energía de tecnologías químicas	Tiempo de vida de las baterías	http://ewfa.org/sites/default/files/rev_of_battery_executive_web_1.pdf

Tabla 16: Variables contenidas en el módulo transporte

En la última tabla de este apartado, tabla 17, se muestran las 19 variables del módulo *recursos*.

Variab	Nombre	Descripción	Fuente
V.1	Producción exergética de petróleo	Medida del ritmo de la extracción de petróleo	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.2	Producción exergética de carbón	Medida del ritmo de la extracción de carbón	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.3	Producción exergética de gas	Medida del ritmo de la extracción de gas	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.4	Producción convencional de petróleo	Cantidad anual de combustibles provenientes de métodos de producción convencionales	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.5	Producción no convencional de petróleo	Cantidad anual de combustibles provenientes de métodos de producción no convencionales	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.6	Producción convencional de gas	Cantidad anual de gas proveniente de métodos de producción convencionales	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.7	Producción no convencional de gas	Cantidad anual gas proveniente de métodos de producción no convencionales	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.8	Producción de carbón	Cantidad anual de carbón producido	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.9	Producción de biocombustibles	Medida de la cantidad de biocombustibles producidos	http://www.bp.com/ , International Energy Agency (IEA)
V.10	Producción exergética de metales	Producción de metales medidos en términos de exergía para cada material considerado como crítico	US Geological Survey http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015).
V.11	Reserva exergética de petróleo	Medida de la calidad de las reservas de petróleo	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.12	Reserva exergética de carbón	Medida de la calidad de las reservas de carbón	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./
V.13	Reserva exergética de gas	Medida de la calidad de las reservas de gas	http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015)./

V.14	Reservas totales	Cantidad de reservas conocidas, medidas en términos de exergía	USGS (2015); Emsley (2001); Frenzel et al. (2014; 2016); Sverdrup and Ragnarsdottir, 2014. http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015).
V.15	Recursos totales	Cantidad de recursos conocidos, medidas en términos de exergía	USGS (2015); Emsley (2001); Frenzel et al. (2014; 2016); Sverdrup and Ragnarsdottir, 2014. http://www.bp.com , Valero, A. (2010). USGS, (2015).
V.16	Ratios de reciclaje	Ratio de reciclaje para cada material estudiado	UNEP (2011)
V.17	Cuota de biocombustibles	Cuota de biocombustibles respecto de los combustibles para el transporte	http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm
V.18	Emisión en la extracción de materiales	Cantidad de CO2 asociada a la extracción de materiales	Valero and Valero (2014)
V.19	Recursos hídricos	Recursos hídricos por países	http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es

Tabla 17: Variables contenidas en el módulo recursos

3.5. Análisis de nuevas variables

En este apartado se realiza un análisis de las nuevas variables incluidas en el modelo dinámico. De cada variable se hace una breve introducción, se explica el motivo de su inclusión en el modelo, su importancia y la relación que guarda con otras variables y o módulos, se incluye la fuente de datos que alimenta el modelo y se explican las limitaciones que tiene el uso de la variable analizada.

Las nuevas variables son:

- Variables que limitan el uso de recursos.
- Intensidad de materiales.
- Pobreza energética y grado de limitación de la pobreza energética.
- Índice de riqueza inclusiva o PIB verde.
- Índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad.
- Precio máximo de la electricidad.
- Cuota mínima de energías renovables.
- Cuota máxima de energía nuclear.
- Límite de emisiones.
- Superficie forestal y cuota mínima de superficie forestal.
- Intensidad de agua de cada tecnología energética.
- Recursos de agua.

3.5.1. Variables que limitan el uso de recursos

A continuación se introducen el conjunto de variables que limitan el uso de recursos, ya que es un factor limitante en el desarrollo de un modelo energético, y por lo tanto, de suma importancia:

- Reserva exergética de petróleo.
- Reserva exergética de carbón.
- Reserva exergética de gas.
- Reserva exergética de metales.

Desde comienzos del siglo pasado, el desarrollo de la sociedad moderna se ha basado en un consumo desmedido de recursos, tanto recursos fósiles, como minerales de uso común y elementos raros. La demanda de minerales para mantener este desarrollo crece de manera constante, lo que conlleva a la extracción masiva de estos para satisfacer la demanda. Según [Krausmann y cols. \(2009\)](#) a lo largo del siglo XX el uso de minerales a nivel mundial ha aumentado en un factor de 8, como se ilustra en la siguiente figura 32, extraída del mismo artículo:

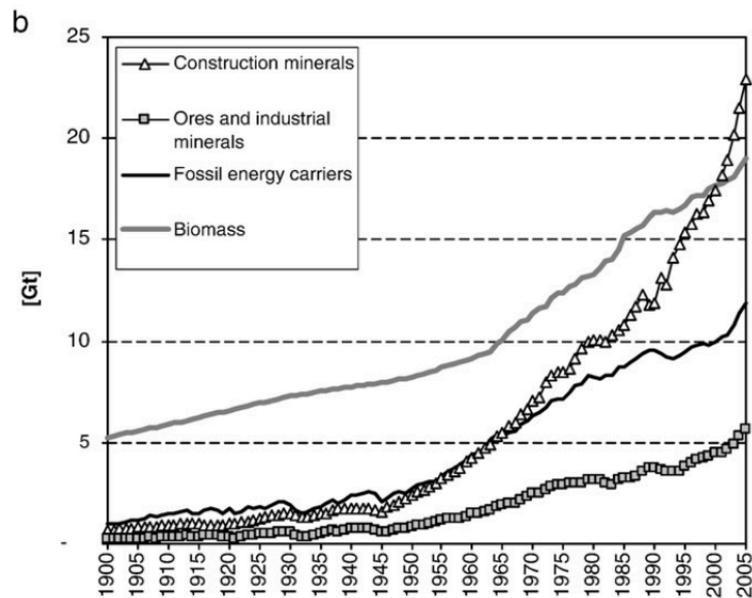


Figura 32: Uso de materiales por tipo, durante el periodo 1900-2005

Este uso desmedido de minerales conlleva varias consecuencias:

Por un lado, nuestro planeta es finito, por lo que también lo serán las reservas (yacimientos cuya explotación es técnica y económicamente viable) y los recursos (total de la materia prima contenida en el subsuelo). Si la demanda de materias primas continua, indudablemente llegará un momento donde la demanda supere al suministro. La cantidad de recursos y reservas disponibles sufre una variación constante, debido a su explotación (disminuyen) y al descubrimiento de nuevos yacimientos (aumentan), además, con el avance tecnológico una fracción de las reservas pasan a considerarse recursos. Pese a ser valores volátiles, una de las fuentes más consultadas es la proporcionada por el United States Geological Service.

Por otro lado, un factor determinante en la extracción de materiales es el decrecimiento de su calidad, es decir, la proporción en la que se encuentra dicho mineral. Como se muestra en [Prior y cols. \(2012\)](#) en su estudio de agotamiento de recursos y como se ilustra en la siguiente figura 33, que muestra la disminución del grado de mineral de oro durante el periodo 1930-2010 en cinco países, Brasil, EEUU, Sudáfrica, Canadá y Australia, durante el periodo 1930-2010:

Esta pérdida en la calidad del recurso supone que los costes energéticos relacionados con su extracción aumentan, y teniendo en cuenta que la industria minera consume alrededor del 8-10% de la energía total mundial [Valero y cols. \(2016\)](#), no cabe duda de la importancia de la minería en un modelo energético: siguiendo la segunda ley de la termodinámica, la concentración de un recurso en la superficie de la tierra tiende a 0, mientras que la energía necesaria para extraerlo tiene a infinito. Además del coste energético hay que tener en cuenta que el consumo de agua y materiales aumenta a medida que disminuye el grado del mineral. En la figura 34 se muestra como ejemplo la relación entre la intensidad energética en la producción de oro respecto de su grado en Australia [34 Prior y cols. \(2012\)](#).

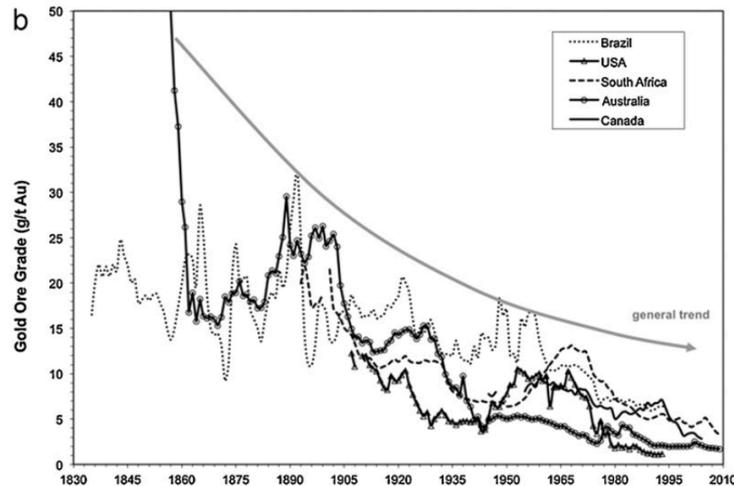


Figura 33: Disminución de la calidad de extracción de oro

Respecto al método empleado para predecir la disponibilidad de recursos materiales, el más simple es dividir las reservas de un material respecto a la producción en un año concreto, que da como resultado el número de años que se puede extraer esa materia prima con ese ritmo de producción.

Sin embargo, si se pretende una mejor aproximación a la disponibilidad de recursos es preferible emplear las curvas de Hubbert. En 1949 King Hubbert era un empleado de Shell que se encargaba de estudiar los pozos y hacer predicciones de su explotación. Se percató de que las explotaciones se extraían exponencialmente hasta que llegaba un momento que cesaba ese progreso exponencial y disminuían al mismo ritmo que había subido hasta el agotamiento del pozo. Descubrió que se podía aplicar esa misma pauta al conjunto de campos de Shell.

En 1956 Hubbert, vaticinó en la revista Science el fin de la extracción de combustibles fósiles [Hubbert \(1956\)](#).

Este método dinámico consiste en una serie de curvas que modelan la producción en función de la producción actual y las estimaciones futuras en base a las reservas disponibles. Todas independientemente del recurso siguen la misma tendencia, comienzan con un aumento suave para dar paso a un aumento exponencial de la producción hasta llegar a un máximo, a partir del cual la producción desciende bruscamente a semejanza del incremento en la subida, formando una gráfica con forma de campana. De acuerdo a estas estimaciones, ya se ha sobrepasado el pico de petróleo.

Estas curvas también se emplean para la predicción de minerales no energéticos. La función que se emplea para ajustar la campana es la siguiente:

$$f(t) = \frac{R}{b_0(2\pi)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{0,5(t-t_0)^2}{b_0}} \quad (1)$$

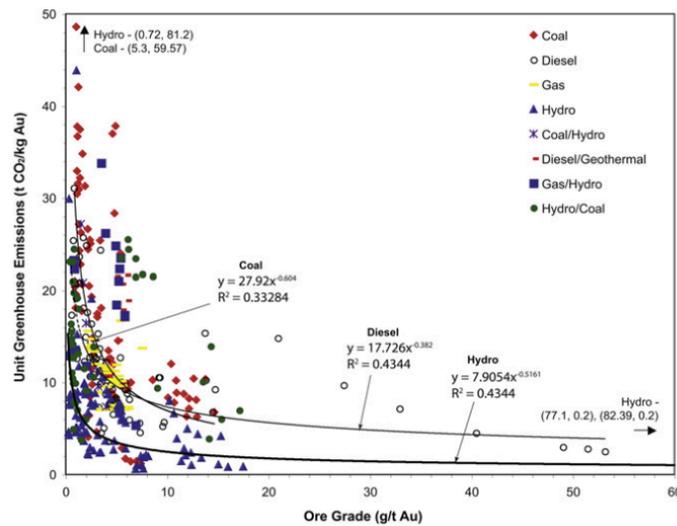


Figura 34: Intensidad energética en la extracción de oro respecto de su calidad

Para ejemplificar este concepto se muestran dos gráficas extraídas de Valero y Valero (2010) que muestran el pico de producción de cobre y aluminio según las curvas de Hubbert, figura 35:

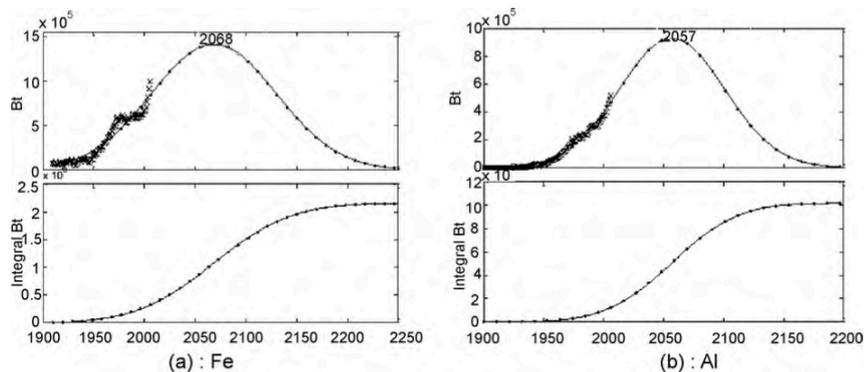


Figura 35: Curvas de Hubbert para el cobre y aluminio

Una vez se han introducido los conceptos de reservas de minerales, el decrecimiento de su grado con la explotación de las minas y las curvas de Hubbert que predicen la disponibilidad de cada recurso, se pasa a describir las unidades que se van a emplear.

A priori la unidad idónea para medir la cantidad de un mineral sería la masa del mismo. El principal problema de emplear estas unidades de medida es que no tienen en cuenta el grado del mineral del que se está hablando, que como se ha explicado anteriormente, tiene una importancia crucial. Es muy diferente hablar de un kilo de oro disperso en miles de dispositivos móviles distribuido en miligramos que un kilo en una mina de este metal.

Antes se ha aplicado la segunda ley de la termodinámica para explicar como a medida que se agota un mineral la energía necesaria para extraerlo tiene a infinito. Pues bien se ha opta-

do por emplear una unidad termodinámica para medir la cantidad de un mineral: la exergía.

La exergía se define como el grado de distinción termodinámica que un sistema tiene respecto de un entorno de referencia o estado muerto. Aplicado al agotamiento de minerales es la cantidad de un mineral en la superficie terrestre, expresado en términos de exergía, respecto a un entorno de referencia, que en este caso es la misma superficie terrestre en el caso de que se hubieran extraído y dispersado todos los recursos minerales y quemado todos los recursos fósiles. Como se ha comentado antes, a medida que nos aproximamos a este estado muerto la energía necesaria para extraer una determinada cantidad de un mineral tiende a infinito.

Para realizar la contabilidad exergética de los recursos minerales se debe conocer la concentración media de un mineral en una mina x_m y en la superficie terrestre del escenario de referencia x_c . En la siguiente ecuación se representa la cantidad mínima de energía asociada con la concentración de una sustancia a partir de una mezcla ideal de dos componentes:

$$b_{ci} = -RT^0 \left[\ln x_i + \frac{1-x_i}{x_i} \ln(1-x_i) \right] \quad (2)$$

Donde R es la constante universal de los gases y T la temperatura de referencia (298.15 K) y x_i es la concentración de la sustancia i. Este valor se sustituye por x_m y x_c para obtener sus respectivas exergías, mientras que la diferencia entre ellas representa la mínima energía necesaria para formar el mineral desde la concentración en la superficie terrestre hasta la concentración en los yacimientos minerales.

En el caso de los recursos fósiles el cálculo exergético es más sencillo y se puede aproximar a partir del poder calorífico del combustible, ya que a partir de esta propiedad podemos comparar la capacidad potencial de producir trabajo de diversos combustibles.

En su trabajo en [Valero y Valero \(2010\)](#), se ha realizado un inventario exergético de 51 materias primas (minerales y recursos fósiles) a lo largo del siglo XX. A partir de estos datos y empleando las curvas de Hubbert han obtenido una serie de curvas que muestran la cantidad de recursos energéticos disponibles en el planeta y su agotamiento. A esta serie de curvas se les han llamado *cuenta atrás exergética*.

De acuerdo los resultados obtenidos en [Valero y Valero \(2010\)](#), el pico de producción de los minerales más importantes se alcanzarán antes de que acabe el presente siglo. En la siguiente figura se muestra la cuenta atrás exergética de los materiales más consumidos en el último siglo [36](#):

Estos valores se han empleado para desarrollar las variables reservas exergéticas de petróleo, gas, carbón y metales, así como la variable recursos. Todas estas variables se encuentran ubicadas en el módulo *recursos* y se relacionan con el módulo *suministro energético* a partir de las variables producción exergética. Tienen una importancia crucial en el modelo ya que limitan la expansión energética a partir de las reservas de minerales del planeta.

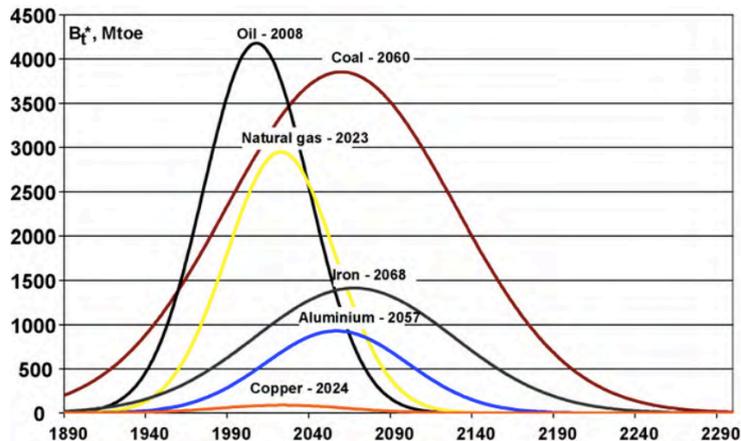


Figura 36: Cuenta atrás exergética de los materiales más consumidos

En cuanto a las limitaciones para emplear dichas variables están que las cantidades de reservas y de recursos de cada mineral están en continuo cambio, a medida que se descubren nuevas reservas y cuando estas pasan a convertirse en recursos. El grado de cada mineral varía según la explotación. Además las curvas de Hubbert son aproximaciones de las estimaciones a partir de las reservas disponibles, por lo que no son valores exactos.

3.5.2. Intensidad de materiales

Como se ha visto en el análisis de las variables que limitan el uso de recursos, la cantidad de recursos minerales que alberga la tierra es finita, por lo que si seguimos la extracción de estos al ritmo actual inevitablemente se llegará a un punto en el que la demanda de minerales sea mayor a la producción. Es por ello que el uso de tecnologías energéticas tiene un límite, marcado por las curvas de cuentas atrás de cada mineral. Como ejemplo, estudios como los de [Viebahn y cols. \(2015\)](#) ponen de manifiesto que ya existen ciertas tecnologías, como los módulos fotovoltaicos, para las que habría limitaciones de recursos en caso de que se desarrollaran a gran escala.

En el artículo [Viebahn y cols. \(2015\)](#) se emplea la tabla periódica para construir un inventario de elementos críticos, basados en el estudio de 12 artículos diferentes. En este estudio además se señala que tecnologías emplean esos elementos (por ejemplo, el Neodimio empleado en la tecnología eólica fue considerado como crítico en 10 de estos 12 estudios). Esta tabla se muestra en la figura 37.

En este mismo estudio se clasifican las tecnologías en dos grupos: tecnologías relevantes (eólica y fotovoltaica), y las tecnologías potencialmente relevantes (tecnologías de concentración solar y almacenamiento de energía). Para cada una de estas tecnologías, se ha desarrollado un listado de los elementos potencialmente críticos. Se muestra como ejemplo la energía solar en la figura 38.

Como se puede observar, los elementos considerados críticos en este artículo para las tecnologías fotovoltaicas son el indio (In), galio (Ga), selenio (Se), cadmio (Cd) y telurio (Te). En este mismo estudio se analiza además la demanda actual y futura para estos elementos en esta tecnología (en kg/MWp). La demanda de minerales críticos por potencia pico se prevé

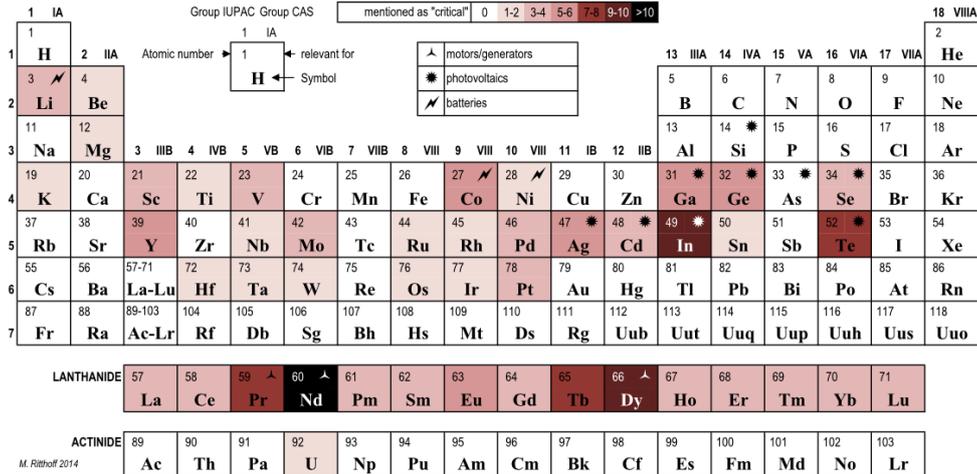


Fig. 1. "Criticality" and usage of elements according to an evaluation of 12 studies.

Figura 37: Grado de criticidad y uso de elementos

Energy source	Technology	Sub-technology	Main potentially critical element/ mineral resources and field of application	Preliminary classification as a result of combining with Fig. 2
				"relevant" → Section 3.2 "potentially-relevant" → Section 3.3 "non-relevant"
Electricity generation	Solar PV (photovoltaics) roof-top, ground-mounted, building-integrated	Crystalline	Ag (contact layer), but quantitatively not relevant and replaceable	X
		Thin film, CdTe	In, Ga, Se (absorber, buffer layer, TCO substrate), CdS (buffer layer) ***** See crystalline cells	X
		Concentrating PV	-	X
		Organic PV	-	X
		Electrochemical PV	SnO ₂ (semiconductor of dye-sensitised solar cells)	X

Figura 38: Evaluación de elementos críticos empleados en energía fotovoltaica

que va a disminuir en las próximas décadas, como se muestra en las figura 39, que muestra la demanda actual y futura de materias primas en células fotovoltaicas. Para el resto de tecnologías el estudio también prevé que disminuirán su intensidad de materiales.

Cell type	Raw material	2013	Source	2025	2050
CIGS	Indium	55.5	[16],[29]	45.0	3.0 *
	Cadmium	1.3	[33]	1.3	0 ***
	Gallium	7.2	[16],[29] **	3.2	1.2
	Selenium	39.3	[33]	17.4	6.3
CdTe	Tellurium	99.7	[16],[33] **	43.1	35.3
	Cadmium	116.7	[33]	63.8	33.0 ***
	Indium	15.5	[16],[29]	15.5	0 *
a-Si	Indium	4.0	[16]	0 *	0 *

Figura 39: Demanda actual y futura en células fotovoltaicas

Esto significa que de continuar a este ritmo de producción, habrá un momento en que la producción y la demanda coincidirán, que es lo que se ha llamado cuello de botella, y marca la limitación de minerales de la que se ha hablado repetidamente en este proyecto. Esto se aprecia gráficamente en el ejemplo de la producción de litio, figura 40, extraído de Valero y cols. (2016). Esta gráfica predice que en el año 2029 la demanda de litio será igual a la producción, por lo que a partir de este momento se necesitará mas litio del disponible.

Las alternativas a este escenario podrían ser por un lado aumentar el reciclaje y la reducción o

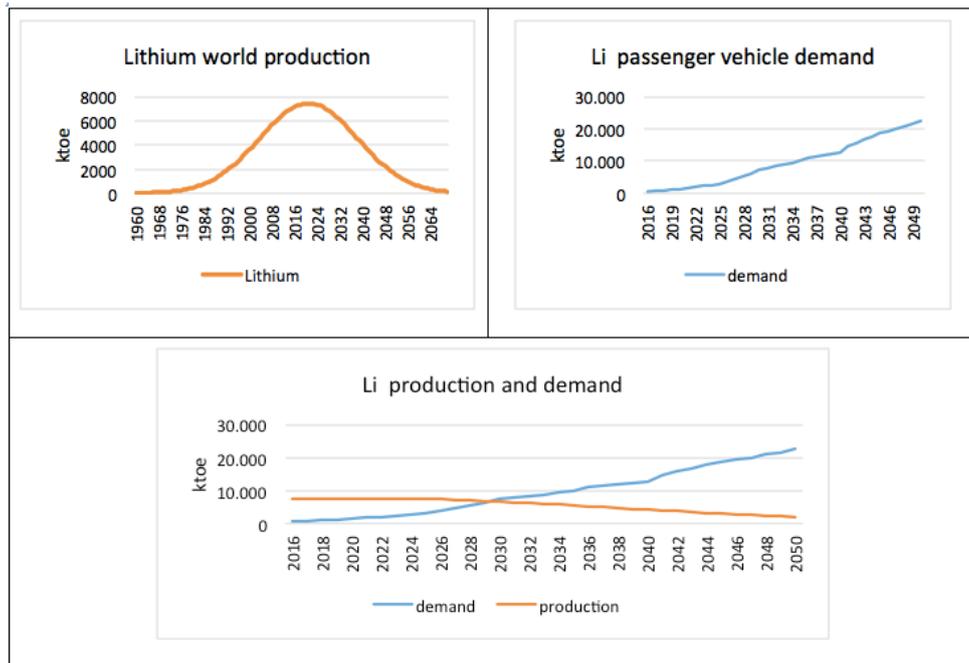


Figura 40: Análisis producción-demanda de litio para vehículos de pasajeros

eliminación elementos críticos en estas tecnologías, como se sugiere en [Stegen \(2015\)](#). Otra alternativa podría ser la disminución de la demanda de energía y transporte en los años venideros, con la consecuente disminución de la potencia instalada. Aunque esta última opción sería la más sostenible, no parece que la tendencia apunte a esa dirección. En la figura 41 se muestra la última previsión de la U.S. Energy Information Administration en su International Energy Outlook [EIA \(2016\)](#) para el consumo total de energía primaria en los países pertenecientes a la OCDE, en un escenario de crecimiento económico bajo (escenario conservador).

Region	History		Projections					Average annual percent change, 2012-40
	2011	2012	2020	2025	2030	2035	2040	
OECD								
OECD Americas	120.6	118.1	123.3	123.9	124.7	126.3	128.8	0.3
United States ^a	96.8	94.4	98.7	98.1	97.5	97.4	98.0	0.1
Canada	14.5	14.5	15.0	15.4	15.9	16.6	17.3	0.6
Mexico and Chile	9.3	9.2	9.7	10.3	11.2	12.3	13.5	1.4
OECD Europe	82.0	81.4	84.0	86.3	88.4	90.4	91.7	0.4
OECD Asia	39.4	39.0	43.0	44.3	45.1	46.0	46.3	0.6
Japan	21.2	20.8	21.7	22.0	21.8	21.6	20.8	0.0
South Korea	11.3	11.4	13.7	14.4	15.0	15.5	15.9	1.2
Australia and New Zealand	6.9	6.8	7.5	7.9	8.3	8.9	9.6	1.2
Total OECD	242.0	238.4	250.4	254.5	258.2	262.6	266.8	0.4

Figura 41: Consumo total de energía primaria por regiones en un escenario de crecimiento económico bajo

La variable que gestiona el uso de materiales por las diferentes tecnologías energéticas es la llamada intensidad de materiales, que genera una demanda de materiales del modulo *recursos* y está afectada directamente por la producción de electricidad de cada fuente de energía. A mayor producción eléctrica mayor será la potencia instalada de las diferentes tecnologías energéticas, y mayor será el requerimiento de minerales.

Los datos de esta variable se han extraído de [Viebahn y cols. \(2015\)](#) y [Zepf y cols. \(2014\)](#), que incluyen completos análisis del consumo de minerales por las diferentes tecnologías energéticas.

En cuanto a las limitaciones de emplear esta variable, se encuentra que la intensidad de materiales varía, como se comentó con anterioridad la intensidad de materiales está disminuyendo. Además nuevos materiales como el grafeno es posible que sustituyan minerales críticos.

3.5.3. Pobreza energética y grado de limitación de la pobreza energética

Se define como la incapacidad de un hogar de mantenerse adecuadamente aclimatado o de no satisfacer otros servicios energéticos domésticos a un costo asequible (aunque existen otras definiciones), y se ve influenciada por el sistema sociopolítico, el clima, el sistema de mercado, el estado de la economía, el marco político y los ingresos. De acuerdo a [Rade-maekers y cols. \(2016\)](#) el 10,2% de la población europea no pueden mantener sus hogares adecuadamente calientes. Esto tiene consecuencias en la salud de las personas que lo sufren, consolida el aumento de la pobreza e imposibilita alcanzar otros objetivos como la lucha del cambio climático.

En este mismo estudio se detallan cuatro alternativas para medir la pobreza energética, tres basadas en el gasto (método más adecuado para medir la pobreza energética):

- Se considera que un hogar sufre pobreza energética si la parte de sus ingresos que destina a gastos energéticos es mayor que el doble de la mediana nacional (2M).
- Si los ingresos, tras descontar los costes de energía, caen por debajo de la línea de pobreza y la parte de sus ingresos destinados a gastos en energía están por encima de la mediana nacional (LIHC).
- Si el gasto energético es inferior a la mitad de la mediana del gasto nacional de energía (pobreza energética oculta HEP).

Y una basada en el consenso: un hogar sufre pobreza energética si es incapaz de mantener la casa caliente durante la estación fría.

A continuación se muestra una gráfica, figura 42, que indica el grado de pobreza energética en España, según la alternativa 2M, en el que se divide la población en cinco grupos según grado de ingresos (1 del 0-20%, 2 del 20-40%, etc.) durante el periodo 2006-2014.

Es una variable de suma importancia en el modelo porque relaciona directamente al sistema energético con la situación de pobreza de la población. Se encuadra dentro del *módulo escenario energético*, y como se ha comentado en el apartado dedicado a la estructura guarda relación directa con el precio de la electricidad (un aumento del coste provoca un aumento de la pobreza energética), con la demanda (si aumenta la pobreza energética disminuye la demanda de energía), con la tasa de desempleo (a mayor desempleo, menos ingresos, lo que conlleva a un aumento de la pobreza energética) y con el IDH-H (ya que en este importante parámetro se ve directamente relacionado con la pobreza).

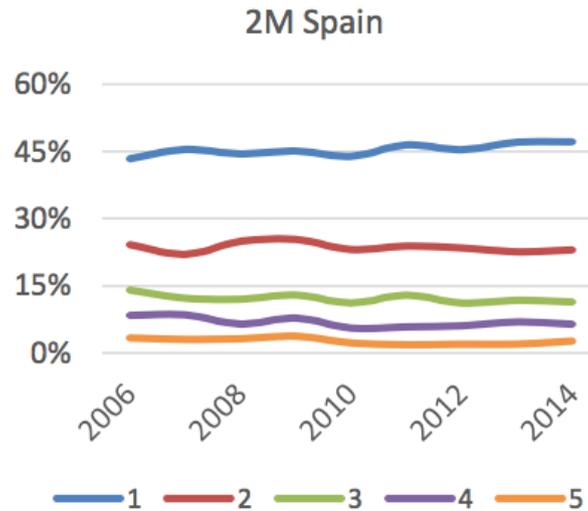


Figura 42: Cuota de pobreza energética en España según el método 2M

Esta variable se encuentra controlada por la variable grado de limitación de la pobreza energética, que es una variable exógena, controlada por el usuario, y que impone al sistema energético la condición del suministro mínimo de energía que se suministrará sin costo a los hogares que sufren pobreza energética. Esta variable puede tomar el valor 0 kWh/día, si se decide que no se aporte energía a los hogares en situación de pobreza energética, o el valor que decida el usuario para satisfacer las necesidades energéticas mínimas.

En cuanto a las bases de datos empleadas para medir la pobreza energética, cabe resaltar que actualmente no existe una base de datos normalizada de la pobreza energética. Países como Francia o Bélgica tienen su propia base de datos de pobreza energética. A continuación se incluye una tabla extraída de Rademaekers y cols. (2016) donde se muestran las principales iniciativas de medida de pobreza energética y sus funcionalidades:

Functionalities	ONPE	EU Fuel Poverty Network	INSIGHT E	BE energy poverty Barometer	Wakefield Obs.
1. Measuring and monitoring energy poverty					
Indicator database	x	x	x	x	✓
Reporting on energy poverty metrics	✓	x		✓	✓
2. Information dissemination and outreach					
Policy measure database		✓		✓	✓
Best practice case studies	x		✓	x	x
Interactive platform for experts (e.g. webinars & events)	x		✓	x	✓
Research and studies		✓	✓	✓	✓
Outreach (e.g. newsletter, events agenda, blog, social media)		✓	✓	x	✓
3. Ad-hoc technical assistance on demand					
	x	x	x	x	x

Figura 43: Principales iniciativas de medida de la pobreza energética y sus funcionalidades

Además también se ha desarrollado la herramienta MEPI por UN-Energy que muestra dos indicadores de la pobreza energética en África.

En cuanto a las limitaciones a la hora de obtener datos de pobreza energética mediante los métodos basados en gastos encontramos:

- Se necesitan muchos datos para conseguir una medida requerida del gasto.
- No tienen un enfoque estandarizado.
- Las mediciones no son comparables entre estados.
- No tienen en cuenta las necesidades reales de energía.
- No consideran las condiciones generales de vida.

3.5.4. Índice de riqueza inclusiva o PIB verde

El índice de riqueza inclusiva es un indicador propuesto por las Naciones Unidas para medir el crecimiento económico teniendo en cuenta las consecuencias medioambientales del desarrollo humano. Este indicador no tiene por qué guardar relación con el PIB, ya que en algunos países el coste medioambiental es tan alto que los valores del PIB y PIB verde son completamente dispares. Como ejemplo, en China se hizo un cálculo similar por la All-China Environment Federation (ACEF), en el que se llegó a la conclusión que las pérdidas producidas por la contaminación en el país asiático suponían el 3,05 % del PIB [Xiaohua \(2016\)](#).

Esta variable se ha incluido en el modelo para complementar el PIB e incluir una medida de los beneficios o perjuicios que provocaría las consecuencias medioambientales en futuros escenarios energéticos. Su valor es muy importante ya que arroja una visión más real de los ingresos de un país al haberle descontado los costes medioambientales y es una potencial herramienta de desarrollo de tecnologías limpias y la disminución de la contaminación.

Se ha incluido en el módulo *demanda* y guarda relación con las emisiones y la superficie forestal, ya que ambas variables permiten aumentar o disminuir el índice de riqueza inclusiva. Afecta directamente al módulo *demanda* y al índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad, aumentando su valor a medida que aumenta el índice de riqueza inclusiva.

Los datos obtenidos para el modelo se extraen de la web de estadísticas de la OCDE y del artículo [Li y Fang \(2014\)](#), ya que existen diferentes medidas para su cálculo, diferentes herramientas y sirve para comparar diferentes valores.

Respecto a las limitaciones de la variable, la más reseñable es la dificultad para medir algunos costes medioambientales, como la disminución de biodiversidad o el aumento medio de la superficie terrestre. El índice de riqueza inclusiva además aporta valores que no son favorables políticamente, al arrojar valores inferiores al PIB (En China se retiró su medida tras comprobar los datos que se obtenían).

3.5.5. Índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad

En los modelos dinámicos tradicionales, la principal variable de medida del desarrollo económico es el PIB. En este trabajo se pretende emplear una variable adicional en la medida del desarrollo económico, que es el índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad (IDH-D).

UN (2015) define el IDH-D como medida del nivel de desarrollo humano medio de la gente en una sociedad una vez que la desigualdad ha sido tenida en cuenta y tiene tres dimensiones, ingresos, salud y educación. Es una variante del IDH en el que se ha descontado para cada dimensión analizada las pérdidas en desarrollo humano dada sus desigualdades. En igualdad perfecta, el IDH y el IDH-D tienen el mismo valor. Toma como referencia un conjunto de índices sensibles a la distribución propuestos por Foster (2005) los cuales se basan en las medidas de desigualdad de Atkinson (1970). En la figura 44 se muestra una representación gráfica del esquema de cálculo del IDH-D.

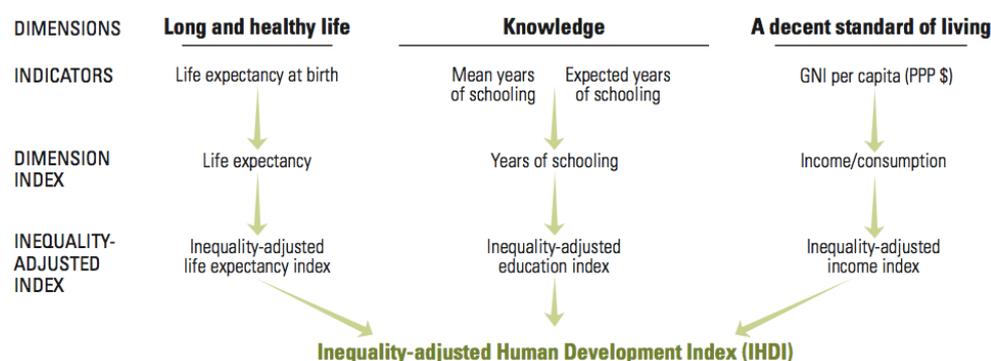


Figura 44: Representación del IDH-D

Es una variable importante en el modelo, ya que permite obtener una medida objetiva del nivel de desarrollo de un área geográfica, y por tanto, como esta se verá afectada por una estrategia energética concreta. Se ubica en el modulo *escenario base* y se ve afectada por siete variables: por el PIB, PIB verde, tasa de desempleo e ingreso medio que influyen en la dimensión de ingresos, y por la pobreza energética, emisiones y la superficie forestal que afectan a la dimensión salud.

El IDH-D se ha calculado para 151 países. La pérdida media global respecto del IDH debido a la desigualdad es del 22,8%, desde el 5,4% de Noruega, país que lidera el ranking hasta Comoras que con un 46,7% figura como el país que sufre una mayor desigualdad. Se calcula como:

$$Perdidas = 1 - [(1 - A_{salud}) * (1 - A_{educacin}) * (1 - A_{ingresos})]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Donde A_x es la medida de desigualdad.

El coeficiente de desigualdad se calcula como:

$$\text{Coeficiente de desigualdad} = \frac{A_{\text{salud}} + A_{\text{educación}} + A_{\text{ingresos}}}{3} \quad (4)$$

En la figura 45 se muestra una tabla donde se muestra la secuencia de cálculo del IDH-D, la pérdida debidas a la desigualdad y el coeficiente de desigualdad para el caso del Líbano.

Indicator	Indicator	Dimension index	Inequality measure* (A)	Inequality-adjusted index
Life expectancy (years)	79.3	0.9119	0.067	$(1-0.0665) \cdot 0.9119 = 0.8513$
Mean years of schooling	7.9	0.5278	0.241	
Expected years of schooling	13.8	0.7641		
Education index		0.6460	0.241	$(1-0.2405) \cdot 0.6460 = 0.4906$
Gross national income (2011 PPP \$)	16,509	0.7714	0.300	$(1-0.2999) \cdot 0.7714 = 0.5400$
Human Development Index		Inequality-adjusted Human Development Index		
$(0.9119 \cdot 0.6460 \cdot 0.7714)^{1/3} = 0.769$		$(0.8513 \cdot 0.4906 \cdot 0.5400)^{1/3} = 0.609$		
Loss due to inequality (%)		Coefficient of human inequality (%)		
$100 \cdot \left(1 - \frac{0.609}{0.769}\right) = 20.8$		$\frac{100 \cdot (0.067 + 0.241 + 0.300)}{3} = 20.2$		

Figura 45: Secuencia de cálculos del IDH-D para el Líbano

Los datos de IDH-D para el modelo se han extraído de la página del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas: <http://hdr.undp.org/es/composite/IHDI>. En esta misma página se puede descargar una hoja de cálculo excel que permite realizar un cálculo del IDH-D en función de los datos que introduzca el usuario.

En cuanto a las limitaciones en el uso del IDH-D, cabe destacar que aunque retrate la desigualdad en la distribución del IDH, no tiene en cuenta las desigualdades que se superponen, ya que las mismas personas pueden estar en la parte baja de más de una distribución. Además existen valores que pueden ser cero (educación) e incluso negativos (ingresos) que se han ajustado a valores no negativos uniformemente entre países, lo que cambian las distribuciones un pequeño grado. Además, en el índice de ingresos ajustados por desigualdad, los ingresos quedan excesivamente afectados por la desigualdad, por lo que se puede dar el caso de que un país tenga unos ingresos mucho mayores que un segundo país, pero tras el ajuste por desigualdad (si el segundo tiene un índice de desigualdad menor), técnicamente estar peor situado en un ranking, teniendo unos ingresos mucho mayores.

3.5.6. Precio máximo de la electricidad

En algunos de los modelos analizados figura la variable coste de la electricidad (para las industrias, los hogares, etc.), en este modelo se pretende dar la oportunidad al usuario de

seleccionar este valor con objeto de definir los gastos que un hogar o una industria destina al consumo eléctrico.

Por un lado permite al usuario explorar la posibilidad de como afectaría al tejido industrial la modificación del coste del consumo eléctrico y ver como afecta a su competitividad.

Por otro lado, del análisis de la variable pobreza energética se ha visto que tanto el método 2M como el LIHC relacionan la pobreza energética con el coste de la electricidad y los ingresos, calcular el precio máximo de la electricidad en función de los ingresos (como una fracción de los ingresos) es una buena medida para homogeneizar el cálculo en regiones diferentes.

Por ejemplo el método LIHC define como pobreza energética si los ingresos, tras descontar los costes de energía, caen por debajo de la línea de pobreza. De acuerdo a [INE \(2014\)](#) el umbral de riesgo de pobreza se fija en el 60% de la mediana de los ingresos por unidad de consumo de las personas. En España para un hogar de una persona es de 8.114 euros (17.040 euros si son dos adultos, etc). De acuerdo a esto, y conociendo el salario más frecuente (en España es de 15.433 euros anuales) se puede limitar el coste de la electricidad para que tras su abono el menor número de personas caigan por debajo de la línea de pobreza.

En el modelo esta variable se encuentra en el módulo *escenario socioeconómico* y como se ha comentado está directamente relacionada con la variable precio máximo de la electricidad. Es una variable exógena que no se alimenta de ninguna base de datos, simplemente toma el valor que selecciona el usuario y condiciona el precio del consumo eléctrico.

En cuanto a sus limitaciones, la principal es que una modificación del precio de la electricidad modifica el mix energético, ya que actualmente las tecnologías más económicas no coinciden con las menos contaminantes (aunque el costo de las energías renovables baja año tras año). Otra limitación es que el mercado eléctrico es un mercado liberalizado, por lo que sería difícil imponer un precio para el consumo eléctrico. Para el consumo doméstico quizá sería más sencillo para combatir la pobreza energética (en España ya existe el precio voluntario al pequeño consumidor).

3.5.7. Cuota mínima de energías renovables

Según fuentes del IDAE, figura [46](#), en 2015 el 13,9% del consumo de energía primaria en España provino de fuentes renovables. En el compromiso 20/20/20 de la Unión Europea se prevé que el 20% del consumo de energía primaria provenga de fuentes renovables.

Mediante esta variable se pretende dar al usuario la potestad de elegir cual es la cuota mínima de aporte energético a partir de fuentes renovables para el periodo de estudio en el sector eléctrico.

Esta variable, también perteneciente al módulo *escenario socioeconómico*, es importante porque afecta directamente al módulo *suministro energético y transporte*, e indirectamente a

	2014		2015	
	(ktep)	Estructura (%)	(ktep)	Estructura (%)
CARBÓN	11.639	9,8	14.426	11,6
PETRÓLEO	50.447	42,6	52.434	42,3
GAS NATURAL	23.662	20,0	24.590	19,9
NUCLEAR	14.934	12,6	14.927	12,1
ENERGÍAS RENOVABLES	17.796	15,0	17.243	13,9
-Hidráulica	3.369	2,8	2.397	1,9
-Otras energías renovables	14.428	12,2	14.846	12,0
-Eólica	4.473	3,8	4.243	3,4
-Biomasa y residuos	5.859	4,9	6.353	5,1
-R.S.U.	204	0,2	260	0,2
-Biomasa	5.302	4,5	5.652	4,6
-Biogás	353	0,3	441	0,4
-Biocarburantes	969	0,8	1.018	0,8
-Geotérmica	19	0,0	20	0,0
-Solar	3.107	2,6	3.213	2,6
-Fotovoltaica	707	0,6	705	0,6
-Solar termoeléctrica	2.142	1,8	2.231	1,8
-Solar térmica	259	0,2	277	0,2

Figura 46: Consumo de energía primaria en España

otras variables como el precio de la electricidad, las emisiones contaminantes y el empleo de minerales. Es una variable exógena que no se alimenta de ninguna base de datos, únicamente toma el valor que introduce el usuario e impone la condición seleccionada.

En cuanto a las limitaciones, mediante el modelo únicamente se puede seleccionar la cuota de energías renovables instalada, pero no la finalmente consumida, que varía dependiendo de las condiciones meteorológicas, de operación, etc. Además, esta sólo afecta al sistema energético, que representa una fracción de la energía primaria consumida.

3.5.8. Cuota máxima de energía nuclear

De acuerdo a [World Nuclear Association \(2016\)](#), existen actualmente 448 centrales nucleares en operación en 31 países (58 más están en construcción), con una capacidad de 391,7 GWe. Proporcionan aproximadamente el 11 % de la electricidad producida (Francia es el país con una mayor cuota de energía nuclear, donde aporta más del 76 %), empleándose como energía de base.

La variable cuota máxima de energía nuclear se introduce en el modelo con la intención de darle al usuario la posibilidad de limitar el peso de la energía nuclear en el futuro escenario energético. Para ello la variable está directamente relacionada con el módulo *suministro de energía*, donde limita el uso de esta fuente de energía a través de la variable producción de electricidad en centrales nucleares. También esta enlazada con el módulo *recursos*, que limita el desarrollo de esta fuente energética de acuerdo a la cantidad de combustible nuclear existente. En el caso de seleccionar el valor 0, el modelo limita al futuro escenario energético a producir electricidad excluyendo del mix energético a la energía proveniente de centrales nucleares.

Indirectamente su modificación altera otras variables, como las emisiones de CO₂ (durante su operación una central nuclear no emite GEI), o al precio de la electricidad, ya que modifica el mix energético del área de estudio.

En cuanto a las limitaciones de la variable, dependiendo del valor seleccionado y del horizonte temporal, virtualmente podría prescindir de centrales nucleares que se encuentran actualmente en construcción.

3.5.9. Límite de emisiones

Según datos del banco mundial, en 2013 se emitieron 35.848.592 kt de CO₂ a la atmósfera, continuando con la tendencia (solo interrumpida en breves periodos) del aumento de las emisiones de este gas, figura 48. Según Cambridge (2014) el 35% de las emisiones de GEI provinieron de la producción de energía.

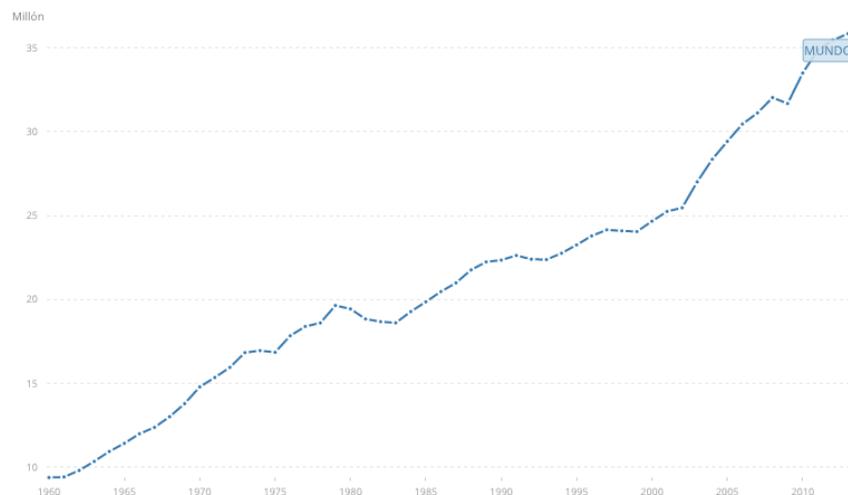


Figura 47: Emisiones mundiales de CO₂ en el periodo 1960-2013

Se ha incluido esta variable con la intención de que el usuario pueda limitar las emisiones de este gas contaminante en el escenario energético de estudio, introduciendo las kt totales máximas que el sistema energético podrá emitir en el escenario energético previsto.

Ubicada en el módulo *escenario socioeconómico* se encuentra directamente relacionada con el módulo *suministro energético*, limitando el sistema energético para cumplir con el valor introducido por el usuario. Esta variable afectará al mix energético de cara a cumplir con su valor, por lo que también modificará el coste de la electricidad.

En cuanto a las limitaciones de esta variable, únicamente controla las emisiones del sistema energético, que son una fracción del total de emisiones de CO₂, ya que otras fuentes como el transporte o la industria tienen una fuerte influencia en las emisiones totales. Otra limitación es que este gas es uno (aunque cuantitativamente el más importante) de los muchos

contaminantes que se emiten a la atmósfera por el sistema energético (aunque si se limitan las emisiones de CO₂ posiblemente se limiten indirectamente el resto de contaminantes).

3.5.10. Superficie forestal y cuota mínima de superficie forestal

En Keenan y cols. (2015) se exponen los resultados del *Global Forest Resources Assessment 2015* (FRA2015), en los que se presenta que la superficie forestal global ha disminuido un 3% en el periodo 1990-2015), de 4,128 a 3,999 millones de hectáreas (la tasa neta anual de superficie forestal se redujo de 7,3 millones de hectáreas anuales en la década de los 90, a 3,3 en el periodo 2010-2015). En la tabla se muestra la tendencia de la superficie forestal en el periodo 1990-2015 en las diferentes sub-regiones en las que se divide el planeta.

Sub-region	1990	2000	2005	2010	2015
Central America	26,995	23,448	22,193	21,010	20,250
Caribbean	5,017	5,913	6,341	6,745	7,195
East Asia	209,198	226,815	241,841	250,504	257,047
East-Southern Africa	319,785	300,273	291,712	282,519	274,886
Europe	994,271	1,002,302	1,004,147	1,013,572	1,015,482
North Africa	39,374	37,692	37,221	37,055	36,217
North America	720,487	719,197	719,419	722,523	723,207
Oceania	176,825	177,641	176,485	172,002	173,524
South America	930,814	890,817	868,611	852,133	842,011
South-Southeast Asia	319,615	298,645	296,600	295,958	292,804
West-Central Africa	346,581	332,407	325,746	318,708	313,000
West-Central Asia	39,309	40,452	42,427	42,944	43,511
Total	4,128,269	4,055,602	4,032,743	4,015,673	3,999,134

Figura 48: Tendencia de la superficie forestal en el periodo 1990-2015

En el artículo OCDE (2008) se pone de manifiesto que la superficie forestal de un territorio tiene una fuerte influencia sobre el PIB y la tasa de empleo (en algunos países la industria forestal contribuye con el 10% del PIB y millones de empleos).

Además, dado que la superficie forestal ocupa el 31% de la superficie terrestre, entra en competencia con otros usos como los agropecuarios (situación del Amazonas) y en un futuro posiblemente energéticos.

Por último, no hay que olvidar que es un importante sumidero de CO₂, y que su tala provoca una gran cantidad de emisiones a la atmósfera.

Es por ello que en el modelo se han incluido las variables superficie forestal (endógena) y cuota mínima de superficie forestal (exógena) dentro del módulo *escenario base*. La primera reco-

pila los datos de la superficie forestal, se ha extraído de <http://data.worldbank.org/indicador/AG.LND.FRS> y muestra la cuota forestal mundial, por regiones y por países. La variable cuota mínima de superficie forestal está relacionada de forma directa con la primera y modela su valor según el valor introducido por el usuario.

El valor seleccionado influye sobre numerosas variables, por lo que su modificación tiene repercusión en los resultados del modelo:

- Aumenta el PIB y especialmente PIB verde.
- Aumenta el IDH-D ya que afecta a su dimensión dedicada a la salud.
- Limita la superficie potencialmente dedicada al suministro energético y cultivo de biocombustibles.
- Aumenta la tasa de empleo.
- Su disminución aumenta las emisiones.

Si analizamos las limitaciones de emplear esta variable, la más obvia es que es un valor difícil de controlar, la reforestación es un proceso lento, no se puede controlar fenómenos meteorológicos que disminuyen la superficie de bosques ni los antropogénicos. Sin embargo mediante su análisis en el modelo se pueden anticipar como influye la masa forestal en determinados escenarios y motivar políticas que favorezcan alcanzar el valor previsto. Una limitación adicional es que si bien ha demostrado que contribuye al PIB y a la tasa de empleo, es difícil conseguir una relación exacta, que además varía por países.

3.5.11. Recursos hídricos e intensidad de agua de cada tecnología energética

Tan sólo el 2.5% del agua del planeta es agua dulce, de este porcentaje tan sólo el 1% es agua superficial o de acuíferos. En un planeta con una población creciente, con un consumo cada vez más elevado de agua parece obvio que este recurso se verá limitado. En la figura 49 se muestra un mapa con el grado de vulnerabilidad de escasez de agua.

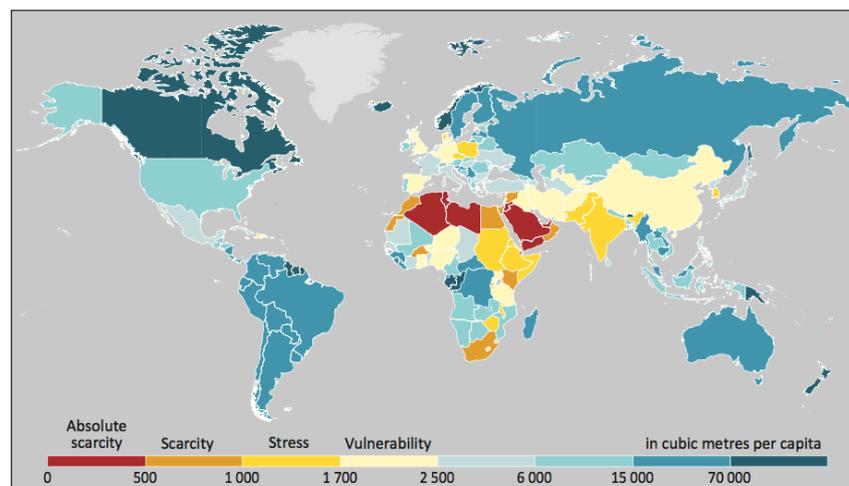


Figura 49: Vulnerabilidad de escasez de agua por países

De acuerdo a [FAO \(2016\)](#) el término recursos hídricos empleado para las estadísticas de caudales totales de agua (internos o externos, agua superficial o agua subterránea, medidos o calculados) no significa que dichos caudales sean totalmente aprovechables o estén totalmente disponibles.

Los recursos hídricos renovables, que son aguas interiores renovadas por el ciclo global del agua, son la fuente principal de agua disponible para el ser humano. Pero solo una parte de estos caudales es aprovechable y realmente usada, debido a que:

- Las posibilidades de movilizar recursos hídricos naturales varían según el país y se practican de forma desigual.
- Los criterios socioeconómicos de aprovechamiento varían según el uso y también dependen de las condiciones físicas de accesibilidad
- Parte de los caudales naturales se deben reservar para necesidades medioambientales de la biosfera y para usos dentro de la corriente.
- Los caudales de agua pueden no ser consistentes de un mes a otro, o de un año a otro, lo que puede dificultar su adecuada captación y su utilización. Vea variabilidad interanual et variabilidad estacional.

Debido a estas complicaciones, el concepto de recursos hídricos aprovechables o disponibles no se adapta a una sola definición o a una definición universal, a pesar de ser la parte más importante del análisis de los recursos hídricos renovables.

Esta variable se ubica en el módulo *recursos* y está relacionada con las variables consumo de agua del módulo *demanda* e intensidad de agua de cada tecnología energética del módulo *suministro de energía*. Es una variable importante ya que limita al sistema energético en función de este preciado recurso. Los datos se han extraído de [FAO \(2016\)](#), una página web dedicada a las estadísticas relacionadas con los recursos hídricos y sus usos.

En relación a la variable intensidad de agua de cada tecnología energética, aporta información sobre la cantidad de agua que requiere cada tecnología energética. Todas las tecnologías de producción de energía, en mayor o menor medida consumen agua, empleada en la generación de energía, en la extracción, transporte y la transformación de combustibles fósiles y en el riego para cultivar la materia prima utilizada para la producción de biocombustibles. En la figura 50 se muestra el consumo de agua para refrigeración en diferentes tecnologías.

Como se ha comentado esta variable se sitúa en el módulo *suministro de energía*, y esta relacionada con la variable recursos hídricos, suministrándole información de los requerimientos de agua del sistema energético. Los datos se extraen de [IEA \(2012\)](#) y [Tidwell y Moreland \(2016\)](#).

Como limitación del uso de estas variables, las relacionadas con la medición del recurso hídrico ya se enumerado previamente. En cuanto a la intensidad de agua de cada tecnología energética, sus requerimientos de agua varían con el emplazamiento y estación (refrigeración).

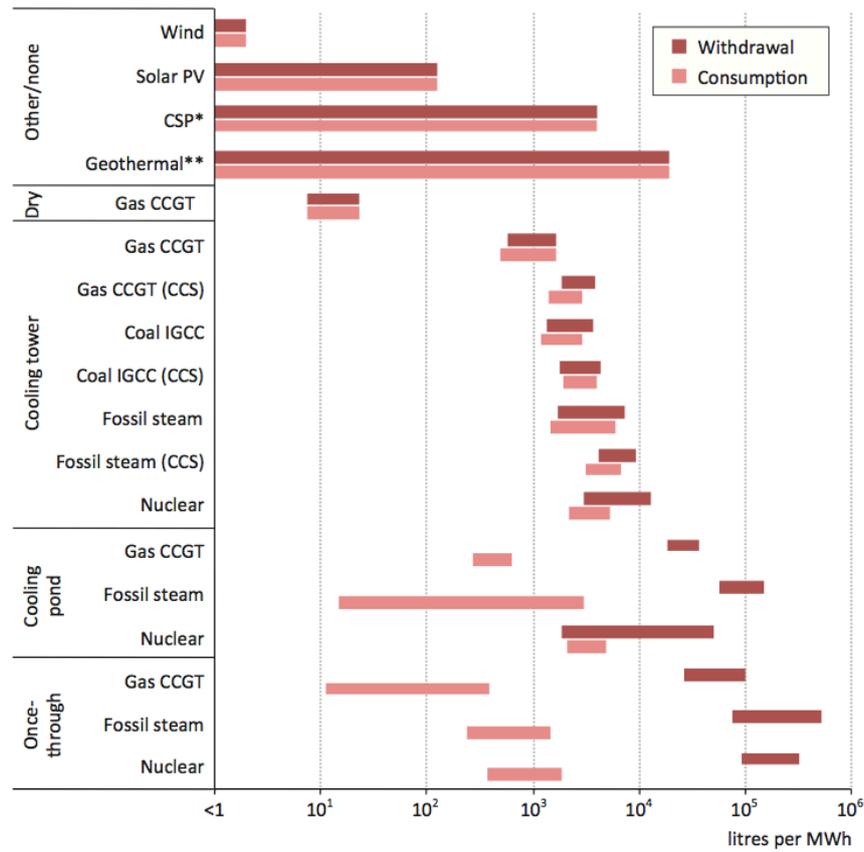


Figura 50: Consumo de agua para refrigeración

3.5.12. Resumen de las variables aportadas por el modelo

En la tabla 18 se muestra un resumen de las variables propuestas para el nuevo modelo dinámico, una breve descripción, sus principales limitaciones y las fuentes de datos empleadas.

Variable	Descripción	Limitaciones	Fuente
Variables que limitan el uso de recursos	Conjunto de cuatro variables que introducen en el modelo el límite de recursos minerales	Las cantidades de reservas y recursos de cada mineral está en continuo cambio	Valero, A., y Valero, A. (2010). Physical geonomics: Combining the exergy and hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion.
		El grado del mineral varía según la explotación	
		Las curvas de Hubbert aproximan las estimaciones, no son exactas.	USGS, (2015). Mineral Commodity Summaries.
Intensidad de materiales	Detalla la cantidad de recursos minerales que emplea cada tecnología energética	Variabilidad temporal en el empleo de materiales.	Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., y Ritthoff, M. (2015). Assessing the need for critical minerals to shift the german energy system towards a high proportion of renewables
		Introducción de nuevos materiales que sustituyan los actuales.	Volker Zepf, A. R. M. A., John Simmons, y Rennie, C. (2014). Materials critical to the energy industry.
Pobreza energética y grado de limitación de la pobreza energética	Mide la cantidad de población que sufre pobreza energética. Mediante el grado de limitación permite al usuario imponer un suministro energético mínimo.	No existe base de datos normalizada.	OMPE
		Mediciones no comparables entre estados.	INSIGHT-E

		No consideran las condiciones reales de vida.	BE Energy Poverty Barometer
Indice de riqueza inclusiva	es un indicador del crecimiento económico que tiene en cuenta las consecuencias medioambientales del desarrollo humano.	Dificultad para medir algunos costes medioambientales.	oecd.stat y Guangdong (2014).
Limite de emisiones	Da la posibilidad al usuario de imponer un límite de emisiones de CO2 al sector eléctrico.	Sólo afecta a las emisiones de CO2	Variable seleccionada por el usuario.
IDH-D	Variable que mide el nivel de desarrollo humano medio de una sociedad una vez que la desigualdad ha sido tenida en cuenta.	No tiene en cuenta las desigualdades que se superponen.	http://hdr.undp.org/es/composite/IHDI
		No considera valores negativos (ingresos).	
		Ingresos quedan excesivamente afectados por la desigualdad	
Precio máximo de la electricidad	Da la posibilidad al usuario de limitar el coste eléctrico	Una modificación del precio afectaría en el modelo al mix energético.	Variable seleccionada por el usuario.
		Difícil de implantar en un mercado liberalizado.	
Cuota mínima de energías renovables	Da la posibilidad al usuario de imponer una cuota mínima de electricidad proveniente de fuentes renovables.	Fácil de controlar la potencia instalada, difícil de imponer en la consumida.	Variable seleccionada por el usuario.
		El sistema eléctrico supone un porcentaje de la energía primaria.	
Cuota máxima de energía nuclear	Da la posibilidad al usuario de imponer una cuota máxima del aporte eléctrico proveniente de energía nuclear.	Derroche económico ante la posibilidad de suprimir centrales nucleares de reciente construcción.	Variable seleccionada por el usuario.
Limite de emisiones	Da la posibilidad al usuario de imponer un límite de emisiones de CO2 al sector eléctrico.	Sólo afecta a las emisiones de CO2	Variable seleccionada por el usuario.
Superficie forestal	Mide la superficie forestal del área de estudio	-	http://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS
Cuota mínima de superficie forestal	Permite limitar la superficie mínima dedicada a este uso.	La reforestación es un proceso lento.	Variable seleccionada por el usuario.
Recursos hídricos	Recursos hídricos disponibles	Dificultad para medir la parte aprovechable.	FAO. (2016). Aquastat
Intensidad de agua	Consumo de agua de cada tecnología energética.	Los requerimientos de agua varían con el emplazamiento, estación, hora del día, etc.	Agency, I. E. (2012). Water for energy. is energy becoming a thirstier resource?
			Tidwell, V, y Moreland, B. (2016). Mapping water consumption for energy production around the pacific rim.

Tabla 18: Resumen de las variables introducidas por el modelo

Conclusiones

En este trabajo fin de master se han analizado cinco modelos dinámicos tradicionales: LEAPS, TIMES, PRIME, WoLiM y RETScreen, con el objetivo de detectar sus carencias en cuatro factores:

- Económicos.
- Tecnológicos.
- Medioambientales.
- Sociales.

Para ello de cada modelo se ha realizado una introducción, se ha clasificado siguiendo los criterios establecidos por [Beeck \(1999\)](#), se ha desarrollado su estructura e interfaz de usuario, se ha incluido un ejemplo de uso y se ha realizado un inventario de las variables que incluyen.

Tras este análisis se ha detectado que los modelos dinámicos tradicionales tienen un enfoque predominantemente económico y carecen de un enfoque mas amplio en relación a los cuatro factores analizados:

En el factor económico, la variable principal con la que trabajan los modelos es el PIB, sin embargo, este parámetro no representa adecuadamente la economía de una población ni su desarrollo. Tampoco incluyen variables que determinen el estado económico real de la población de un área geográfica.

En cuanto al factor tecnológico, los modelos analizados consideran los sistemas de producción de energía como ilimitados, no teniendo en cuenta las posibles limitaciones de cada tecnología. Tampoco tienen en cuenta las limitaciones de espacio ni la competencia por el uso del suelo. Otra carencia es que no toman en cuenta la variabilidad de cada fuente energética.

En lo que respecta al factor ecológico, estos modelos miden las emisiones y principales impactos medioambientales en el mejor de los casos, pero no incluyen el agotamiento de minerales ni su pérdida de calidad.

En lo que concierne a los factores sociales, no tienen en cuenta si determinadas tecnologías energéticas tienen un impacto positivo o negativo en la sociedad, por lo que no toman medidas para limitarlas o potenciarlas. Tampoco tienen en cuenta en el modelo repercusiones sociales derivadas del sistema energético como la pobreza energética.

En base a este análisis se ha desarrollado las bases de un nuevo modelo dinámico que supla las limitaciones detectadas. Con este fin se ha estructurado el análisis del modelo a semejanza del análisis de los modelos tradicionales:

Se ha comenzado con una introducción al propósito y los objetivos del nuevo modelo.

Se ha realizado una clasificación del modelo siguiendo los criterios establecidos por [Beeck \(1999\)](#).

Se ha desarrollado la estructura del nuevo modelo en cinco módulos relacionados: escenario base, demanda, suministro de energía, transporte y recursos. Se ha introduciendo las variables empleadas y las relaciones que guardan a través de diagramas de relaciones de cada uno de los módulos.

Se ha inventariado las variables incluidas en el modelo, tanto las extraídas de los modelos analizados como las nuevas variables aportadas por el modelo, incluyendo una breve descripción y las fuentes de las que se extraen los datos.

Se concluye esta parte del trabajo con un apartado en el que se incluyen y desarrollan las XX nuevas variables que aporta este modelo, realizando una explicación de cada variable, su situación en la estructura del modelo y relación con otras variables, la fuente de datos de la que se extraen los valores y las limitaciones que presenta el uso de cada variable.

En la tabla 19 se presenta un cuadro resumen en el que se muestran las limitaciones de los modelos dinámicos analizados en base a los cuatro factores propuestos y las variables incluidas en el nuevo modelo que solventan estas limitaciones.

Factor	Limitaciones.	Variables propuestas.
Economico	El PIB no representa adecuadamente la economía real de una población.	Se incluyen el PIB verde el IDH-D como medida adicional del desarrollo humano.
Tecnologico	No valoran posibles limitaciones de cada tecnología.	La variable intensidad de materiales regula el consumo de materiales de cada tecnología.
		Mediante la cuota mínima de energías renovables permite imponer el desarrollo de estas tecnologías.
		El Limite de emisiones marca un tope en las emisiones de CO2 producidas.
		La variable cuota máxima de energía nuclear permite limitar el aporte nuclear al mix energético.
		A través de los recursos hídricos y la intensidad de agua se introduce la limitación de agua dentro del modelo.
Medioambiental	No incluyen los agotamientos de minerales. Tampoco la pérdida de su calidad. No muestra coste económico de las consecuencias medioambientales.	Se incluye la variable que regula la disponibilidad de recursos minerales.
		Mediante el PIB verde se introduce un indicador económico de los costes medioambientales.
		Mediante las variables superficie forestal y cuota mínima de superficie forestal se permite proteger la superficie destinada a este uso.
Social	No incluye ningún parámetro de repercusión social.	Mediante la inclusión de la limitación de la pobreza energética se da la posibilidad de limitar en el modelo la pobreza energética del área de estudio.
		Mediante el precio máximo de la electricidad se limita su coste.

Tabla 19: Resumen de las conclusiones

El desarrollo de las bases de un nuevo modelo dinámico ha supuesto la constatación de que existe la posibilidad de desarrollar modelos dinámicos mas integrales, que tengan un mayor enfoque a la situación económica real que vive una sociedad, una mayor sensibilidad a las consecuencias sociales que supone un determinado escenario energético y que tenga en cuenta que nuestro planeta es finito, así como los materiales que alberga, y que cada extracción de mineral supone una pérdida de su calidad y un aumento del gasto energético.

Pese a la posibilidad de desarrollar modelos dinámicos mas completos, ello no carece de dificultad. Existen variables difíciles de medir, otras que tienen una gran variabilidad, también algunas que son subjetivas y tiene o no valor en función de quien realiza el análisis. Es por ello que únicamente podemos hacer aproximaciones a lo que seria un modelo dinámico ideal.

El modelo que se ha propuesto en este trabajo final de master pretende servir al modelo MEDEAS, que se está desarrollando en la actualidad por un grupo de universidades europeas, consistente en un software abierto que modele el sistema energético europeo hacia un escenario de bajas emisiones de carbono alcanzando objetivos como la competitividad, la protección del medio ambiente, la creación de trabajos de calidad y el bienestar social. Para ello el modelo empleará ocho paquetes de trabajo, como el desarrollo de escenarios o el análisis de políticas y estrategias de implementación. Se puede encontrar más información acerca del modelo MEDEAS en <http://www.medeas.eu/>.

Referencias

- Ates, S. A. (2015). Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using {RETScreen}. *Energy*, 90, Part 1, 417 - 428. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215009548> (Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.059>
- Beeck, N. V. (1999). Classification of energy models. Descargado 2016-06-01, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.43.8055&rep=rep1&type=pdf> (Eindhoven University of Technology)
- Cai, W., Wang, C., Wang, K., Zhang, Y., y Chen, J. (2007). Scenario analysis on {CO₂} emissions reduction potential in china's electricity sector. *Energy Policy*, 35(12), 6445 - 6456. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507003497> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.026>
- Cambridge, U. (2014). *Cambio climático: implicaciones para el sector energético*. Descargado 2016-07-05, de <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/06/Publicacion-Cambio-Climatico-implicaciones-para-el-sector-energetico-IPCCC-AR5.pdf>
- Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Óscar Carpintero, y Miguel, L. J. (2014). Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using {RETScreen}. *Energy*, 77, 641 - 666. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214011219> (Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.063>
- Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., y Miguel, L. J. (2014). World limits model (wolim) model documentation [Manual de software informático]. Descargado 2016-07-05, de http://www.eis.uva.es/energiasostenible/wp-content/uploads/2014/09/WoLiM_1.0-Model-Documentation_Sept-2014.pdf
- CETC. (2005). Retscreen engineering & cases textbook [Manual de software informático]. Descargado 2016-06-23, de http://publications.gc.ca/collections/collection_2007/nrcan-rncan/M154-13-2005E.pdf
- di Sbroiavacca, N. (2013). *El modelo leap, principales características y su aplicación en el diseño de políticas energéticas y ambientales*. Descargado 2016-06-29, de <http://aquasec.org/wp-content/uploads/2013/06/Di-Sbroiavacca-Presentacion-La-Serena-Long-range-Energy-Alternatives-Planning-LEAP.pdf>
- E3MLab. (2014). Primes model. detailed model description [Manual de software informático]. Descargado 2016-06-08, de https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models/docs/primes_model_2013-2014_en.pdf

- EIA. (2016). *International energy outlook 2016. with projections to 2040*. Descargado 2016-09-22, de [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- Eurelectric. (2010). *Power choice. pathways to carbon-neutral electricity in europe by 2050*. Descargado 2016-08-11, de http://www.eurelectric.org/media/45274/power__choices_finalcorrection_page70_feb2011-2010-402-0001-01-e.pdf
- FAO. (2016). *Aquastat*. Descargado 2016-11-18, de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>
- Hubbert, M. (1956). *Energy resources: a report to the committee on natural resources of the national academy of sciences.* , 137.
- IEA. (2012). *Water for energy. is energy becoming a thirstier resource?* Descargado 2016-09-06, de http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2012/WEO_2012_Water_Excerpt.pdf
- INE. (2014). *Encuesta de condiciones de vida (ecv)*. Descargado 2016-09-13, de <http://www.ine.es/prensa/np908.pdf>
- Islas, J., Manzini, F, y Masera, O. (2007). A prospective study of bioenergy use in mexico. *Energy*, 32(12), 2306 - 2320. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544207001351> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.07.012>
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F, de Freitas, J. V., Grainger, A., y Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the {FAO} global forest resources assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9 - 20. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715003400> (Changes in Global Forest Resources from 1990 to 2015) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., y Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, {GDP} and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696 - 2705. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800909002158> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Li, G., y Fang, C. (2014). Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green gdp' accounting. *Ecological Indicators*, 46, 293 - 314. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14002222> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.020>
- Lopez, A. E. (2013). *Simulación de procesos*.
- Loulou, R., y Labriet, M. (2007). *Etsap-tiam: the times integrated assessment model part i: Model structure*. Descargado 2016-07-05, de <http://iea-etsap.org/index.php/documentation>

- Loulou, R., remne, U., Kanudia, A., Lehtila, A., y Goldstein, G. (2005). Documentation for the times model [Manual de software informático]. Descargado 2016-07-12, de <http://iea-etsap.org/index.php/documentation>
- OCDE. (2008). *Natural resources and pro-poor growth: The economics and politics*. Descargado 2016-10-03, de <http://www.oecd.org/greengrowth/green-development/42440224.pdf>
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., y Behrisch, J. (2012). Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, 22(3), 577 - 587. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378011001361> (Global transformations, social metabolism and the dynamics of socio-environmental conflicts) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009>
- Rademaekers, K., Yearwood, J., Ferreira, A., Pye, S., Hamilton, I., Agnolucci, P., y Grover, D. (2016). *Selecting indicators to measure energy poverty under the pilot project 'energy poverty assessment of the impact of the crisis and review of existing and possible new measures in the member states*. Descargado 2016-10-10, de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Selecting%20Indicators%20to%20Measure%20Energy%20Poverty.pdf>
- SEI. (2016). *Leap*. Descargado 2016-10-03, de www.energycommunity.org/
- Shabbir, R., y Ahmad, S. S. (2010). Monitoring urban transport air pollution and energy demand in rawalpindi and islamabad using leap model. *Energy*, 35(5), 2323 - 2332. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210000794> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.025>
- Stegen, K. S. (2015). Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. *Energy Policy*, 79, 1 - 8. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514006806> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.015>
- Tidwell, V., y Moreland, B. (2016). Mapping water consumption for energy production around the pacific rim. , 13. Descargado 2016-10-03, de <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2016/160412r.pdf>
- UN. (2015). *Human development reports*. Descargado 2016-10-03, de <http://hdr.undp.org/es>
- Valero, A., Ortego, A., Guiomar Calvo, A. V., Círez, F., Kimmich, C., Černý, M., ... Falsini, S. (2016). *Technical report; number 2.1; guiding european policy toward a low-carbon economy. modelling sustainable energy system development under environmental and socio-economic constraints*. Descargado 2016-11-23, de <http://www.medeas.eu/>
- Valero, A., y Valero, A. (2010). Physical geonomics: Combining the exergy and hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1074 - 1083. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344910000510> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.010>
- Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., y Ritthoff, M. (2015). Environmental, technical and financial feasibility study of solar power plants by retscreen, ac-

-
- ording to the targeting of energy subsidies in iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 655 - 671. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003408> doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.070>
- World nuclear association. (2016). Descargado 2016-10-25, de <http://www.world-nuclear.org/>
- Xiaohua, S. (2016). *Call for return to green accounting*. Descargado de http://www.chinadaily.com.cn/china/2007-04/19/content_853917.htm
- Zepf, V., Simmons, J., Reller, A., Ashfield, M., y Rennie, C. (2014). *Materials critical to the energy industry*. Descargado 2016-10-04, de http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/sustainability/group-reports/ESC_Materials_handbook_BP_Apr2014.pdf
- Álvarez Watkins, P. (2004). *Modelo de planificación energética orientado al desarrollo sostenible* (Tesis Doctoral). Descargado 2016-05-18, de <http://eltroldesdesucaverna.com/archivos/m180270212.pdf>