

La transición hacia energías renovables: límites físicos y temporales

Margarita Mediavilla^a, Carlos de Castro^a, Iñigo Capellán^a, Luis Javier Miguel^a,
Iñaki Arto^{1b}, Fernando Frechoso^a

^aEscuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce s/n, Universidad de
Valladolid, Spain. marga@eis.uva.es

^b Institute for Prospective Technological Studies, DG Joint Research Centre,
European Commission, inaki.arto@ec.europa.eu

Abstract. En este artículo se estudia la posible transición hacia una sociedad basada en energías renovables y se muestran los resultados obtenidos con un modelo dinámico construido para este propósito. El modelo usa datos de las estimaciones de agotamiento de recursos naturales (petróleo, gas, carbón, uranio) y estima la demanda de energía. Bajo diferentes escenarios, se estudia el efecto de diversas políticas de sustitución. Los resultados muestran que el techo del petróleo va a ser la primera restricción y la más relevante, y no va a ser sencillo superarla. El vehículo eléctrico puede dar lugar a ahorros interesantes, pero, si se quiere evitar el declive del petróleo, son muy insuficientes. Los biocombustibles se encuentran todavía más limitados debido a la enorme cantidad de tierra fértil que requieren y a sus bajos rendimientos. Estos dos hechos evidencian que superar el declive del petróleo va a necesitar políticas mucho más ambiciosas que la mera sustitución tecnológica. Si no cambia de forma sustancial la relación petróleo-economía el crecimiento económico mundial puede verse fuertemente limitado o incluso llegar a ser negativo. Por otro lado, la producción de energía eléctrica no es un problema tan relevante a corto y medio plazo.

Keywords: peak oil, renewable energy, system dynamics.

¹ Las opiniones expresadas en este artículo corresponden a los autores y no se corresponden necesariamente con las de la Comisión Europea o sus servicios.

1. Introducción

La energía es uno de los aspectos más importantes de la vida, y la transformación a una sociedad no basada en combustibles fósiles está convirtiéndose en una cuestión máximo interés. Pocos ponen en duda que tenemos una importante crisis energética, tanto desde el punto de vista de la contaminación (cambio climático), como de la extracción de energía (“peak oil”). Después de años de exhaustivo estudio, el petróleo es el recurso más estudiado y las previsiones hablan de un pico de extracción, ampliamente reconocido, aunque los estudios varían en las fechas y la forma del declive (Campbell and Laherrère 1998; Hubbert 1956, Robelius 2007, ASPO 2008, Höök 2009, Kopelaar 2005, Skrebowski 2008, Aleklett et al. 2008, EWG 2008, UKERC 2009, Castro et al. 2010). Otros recursos energéticos están mucho menos estudiados, pero algunos se aventuran también a dar datos de curvas de extracción máxima similares a los del petróleo (EWG 2007, Tao and Li 2007, Patzek and Croft 2010, EWG 2006, Höök 2009, Guseo 2011, ASPO 2009, Laherrère 2006, Mohr and Evans 2011, Mohr and Evans 2009).

Por otra parte, cuando hablamos de energía, hay que tener en cuenta los usos, ya que no todas las fuentes de energía son intercambiables de forma inmediata, algunas necesitan importantes cambios tecnológicos o sociales. En este artículo nos ha parecido importante estudiar dos de los usos básicos de la energía: en forma de electricidad y en forma de combustibles líquidos.

La sustitución del petróleo en la generación de combustibles líquidos es muy problemática, ya que, en la actualidad, sólo los biocombustibles pueden sustituirlo directamente en la mayor parte de los usos. Los biocombustibles tienen rendimientos y tasas de retorno energético muy cuestionadas, y, aunque se esperan mejoras en los de segunda generación, los rendimientos deben mejorar mucho para ser una alternativa a gran escala al petróleo (Papong et al. 2010, Field et al. 2007, Pimentel et al. 2009).

De forma indirecta, se pueden sustituir el petróleo en el transporte utilizando vehículos eléctricos, lo cual tiene también sus limitaciones: las prestaciones técnicas son mucho menores, no todo el transporte puede ser sustituido, las baterías necesitan elementos escasos, es preciso un aumento de producción eléctrica, etc. (Offer et al. 2010, AISBL2009, EEA 2009, Hacker et al. 2009, FFT 2011). Otras alternativas de sustitución del petróleo se basan en la implantación del transporte público, el uso de gas natural, medidas de ahorro como el fomento del transporte no motorizado, mejora del aislamiento térmico, reordenación del territorio, etc. Todas ellas requieren cambios sociales e infraestructuras importantes y no las vamos a tratar en este artículo.

En la generación de energía eléctrica nuestros modelos encuentran más fácil sustituir los combustibles no renovables. Existen en la actualidad tecnologías renovables con tasas de retorno energético y eficiencias bastante aceptables (eólica, hidráulica, solar termoeléctrica). El problema de la falta de estabilidad de la energía renovable dificulta la implantación de estas tecnologías y necesita infraestructuras extra, sin embargo, en este estudio no hemos abordado este problema con profundidad, dejándolo para futuros modelos más complejos, aunque algunos autores muestran que puede ser un límite importante (Trainer 2011).

El artículo que presentamos utiliza un modelo dinámico para estudiar la sustitución del petróleo y los combustibles no renovables aconsejar similar al utilizado en Mediavilla 2011, pero utilizando una recopilación de datos más exhaustiva. El modelo permite cuantificar los aspectos básicos de la sustitución, y servir como un marco de límites físicos que las políticas económicas no pueden traspasar. *Por lo tanto, el objetivo del modelo no es predecir el comportamiento futuro de la economía mundial, sino establecer qué tipo de políticas son imposibles en base a las previsiones de agotamiento de recursos de los diferentes expertos y en base a la estimación de la demanda.*

2. Modelo mundial

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes modelos energía-economía globales (IIASA 2004, IIASA 2001, WETO 2003, D'Alessandro 2010) algunos de ellos basados en dinámica de sistemas (Fiddaman 1997, Dale 2012). Sin embargo, son escasos los modelos que reconozcan explícitamente fenómenos como el cénit del petróleo y lo relacionen con la demanda generada por el crecimiento económico (Meadows 1972, Meadows 1992, Castro 2009, Castro 2009(a), García 2009).

En anteriores estudios (Castro et al. 2009, Castro 2009(a)) los autores hemos estudiado la extracción de recursos energéticos basados en modelos energía-economía de dinámica de sistemas realimentados. Sin embargo, el que presentamos aquí es un modelo relativamente simple en su aspecto dinámico pero que reúne y relaciona datos de muy diversa índole. Frente a modelos anteriores, éste tiene la ventaja de permitirnos incluir las estimaciones de diversos expertos y de tratar de forma más sencilla la relación energía-economía. El modelo sirve para obtener una visión de conjunto del problema energético global y contempla los siguientes aspectos:

- El crecimiento/decrecimiento económico global y la demanda de energía en forma de combustibles líquidos y de electricidad
- El agotamiento de los recursos naturales (petróleo, gas, carbón, uranio, litio, cobre)
- Alternativas técnicas al petróleo: el vehículo eléctrico y los biocombustibles
- La generación de energía eléctrica con dos fuentes básicas: renovables y no renovables

El esquema básico se puede ver en la figura 1. La actividad económica mundial o PIB (GDP) es un stock del modelo que es incrementado por el crecimiento económico. Este PIB determina las demandas de petróleo y electricidad mundiales. Los stocks de recursos naturales se encuentran en la parte baja de la figura 1: petróleo y electricidad no renovable, sujetos a límites de extracción; biocombustibles y electricidad renovable (no agotables pero finitos).

La relación entre economía y energía de nuestro modelo podría describirse como dual, pues el modelo se comporta como supply-driven si hay escasez de recursos y como demand-driven en caso contrario. La lógica que subyace a este planteamiento es la siguiente:

- Partimos de un escenario de crecimiento económico que, dadas las intensidades de petróleo y electricidad del PIB, nos determina la demanda de combustibles líquidos y electricidad.
- Por otro lado, teniendo en cuenta las curvas de agotamiento de los recursos y las diferentes políticas de fomento de las renovables, se determina la oferta potencial de energía en cada momento.
- Si la demanda energética asociada a nuestro escenario de crecimiento económico es inferior a la cantidad máxima disponible, los precios se fijarían de forma que la demanda energética se satisface en su totalidad. En este caso, sería la oferta la que se ajustaría al nivel de consumo energético del escenario económico analizado (demand driven model).
- Si la demanda de energía es mayor que la oferta tendremos una situación de escasez de energía. En tal caso la demanda de energía se separa de la oferta de petróleo, lo cual da lugar a escenarios irreales en los que oferta y demanda no cuadran (supply driven). De esta forma, *el modelo detecta los escenarios de crecimiento económico y las políticas que son incompatibles con los límites físicos.*

Por lo tanto, este es un modelo ***sin realimentación energía-economía***, y ello hace que sea simplemente un ***modelo de restricciones físicas máximas***. Al omitir las realimentaciones energía-economía (vía precios) obviamos dinámicas que tienden a hacer que la economía se contraiga por la escasez. Hay que tener en

cuenta que muchas de estas realimentaciones acentúan las depresiones económicas, por lo tanto, este es un modelo “marco”, que define los límites, pero la realidad puede verse atrapada en lazos de realimentación que aceleren las recesiones.

Por último, las políticas básicas del modelo se encuentran en las elipses de la figura 1: el crecimiento económico (economic growth), el cambio al vehículo eléctrico e híbrido (change to E, change to hybrid) y la inversión en electricidad renovable (renew_investment).

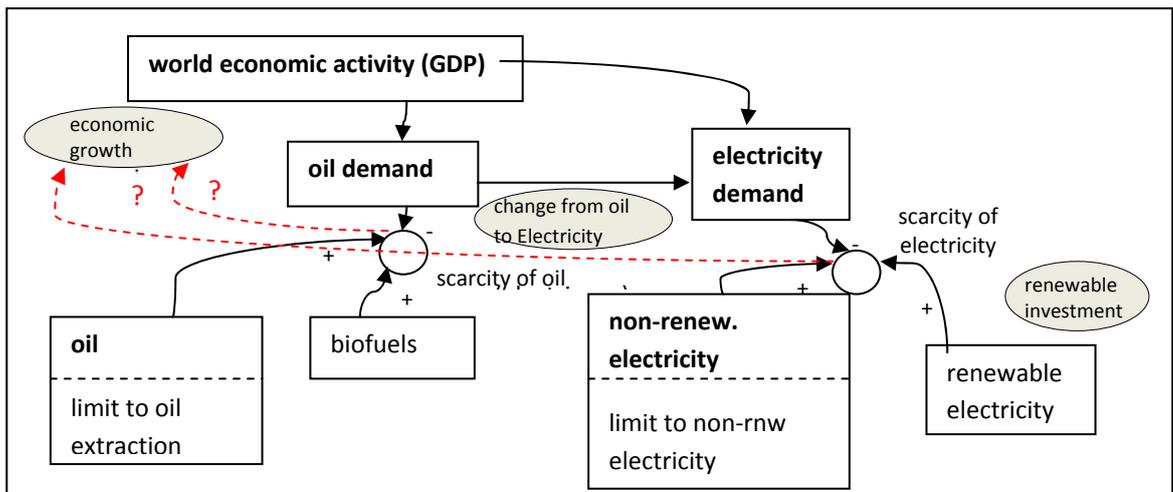


Figura 1: Elementos básicos del modelo usado.

3. Estudio de los recursos energéticos mundiales

Para hacer una estimación de la disponibilidad de combustibles fósiles hemos recopilado los estudios realizados hasta la fecha sobre este tema, buscando aquellos que no sólo hablan de recursos o reservas, sino que, además, tienen en cuenta los límites en los ritmos de extracción (como el “peak oil”). Estos trabajos (ASPO 2009, Höök 2009, EWG 2007, EWG2006, Mohr and Evans 2011, Mohr and Evans 2008, Patzek and Croft 2010, Lahèrre 2006) aportan curvas de extracción en función del tiempo como las de las figuras 3, 4, 5, y 6 a base de estimar el declive anual y de suponer que, mientras los límites no se alcanzan, la extracción sigue un crecimiento tendencial.

Para poder utilizar estos datos en nuestro modelo debemos transformarlos, ya que, en un modelo dinámico que contempla la demanda, la extracción depende de ésta (si la economía mundial entra en crisis y no se demanda gas, por ejemplo, no se extraerá). La extracción será, por tanto, el mínimo entre la demanda y la extracción máxima. Para ello hemos integrado las curvas de

extracción máxima en función del tiempo y las hemos convertido en curvas de extracción máxima en función de los recursos (ver Anexo 2).

En este modelo sólo se van a estudiar los recursos que proporcionan combustibles líquidos (petróleo) ya que de ellos depende más del 90% del transporte, y los usados para electricidad. Con ello, ignoramos algunos consumos energéticos, como el gas natural y el petróleo para calefacción e industria (serán estudiados en futuros modelos).

3.1 Petroleo

En la gráfica 3 podemos ver un resumen de las predicciones de diversos autores (ASPO 2009, Skrebowski 2008, WEO 2010, Höök 2009, EWG 2008, Lahèrrere 2006) para la extracción de petróleo. Se puede ver que ASPO y EWG estiman curvas de extracción máxima (en función del tiempo) con perfiles en forma de pico, mientras Uppsala y Skrebowski dan perfiles en forma de meseta (aunque sólo dan datos hasta 2030). Las estimaciones de Lahèrrere son muy elevadas y mucho mayores que los datos de producción observados en los últimos cinco años (BP 2011), que muestran un estancamiento bastante claro a partir de 2005 (a pesar de que la disminución de la demanda debida a la crisis económica no aparece hasta 2009).

No hemos tenido en cuenta las estimaciones de producción futura que ofrece la Agencia Internacional de la Energía en sus escenarios “bussiness as usual”, por considerar que estos escenarios, en los cuales se adjudica un importante papel al crudo no encontrado o no desarrollado, son irrealistas, como ha criticado Uppsala en Aleklett et al. 2010 (y como parecen confirmar los datos históricos de los últimos cinco años). En su lugar, nos parece más acertada la estimación de Uppsala, que se basa en los datos de la propia Agencia, pero eliminando aquellos descubrimientos de crudos poco coherentes con las restricciones geológicas.

De todas las estimaciones que dan estos estudios, hemos elegido para el modelo las que juzgamos más acertadas para cada combustible. Por ello, hemos tomado como estimaciones para el petróleo convencional y no convencional las de ASPO y Uppsala, la primera estimando un declive del 2% a partir del momento actual y la segunda estimando una meseta de producción hasta 2030. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que los datos exactos de extracción de petróleo son difíciles de comparar entre diversos estudios debido a los diferentes criterios que cada autor utiliza para definir qué se considera petróleo. Ligeras disparidades entre los datos reales y las estimaciones (como los que se pueden observar en la figura) son, por tanto, inevitables.

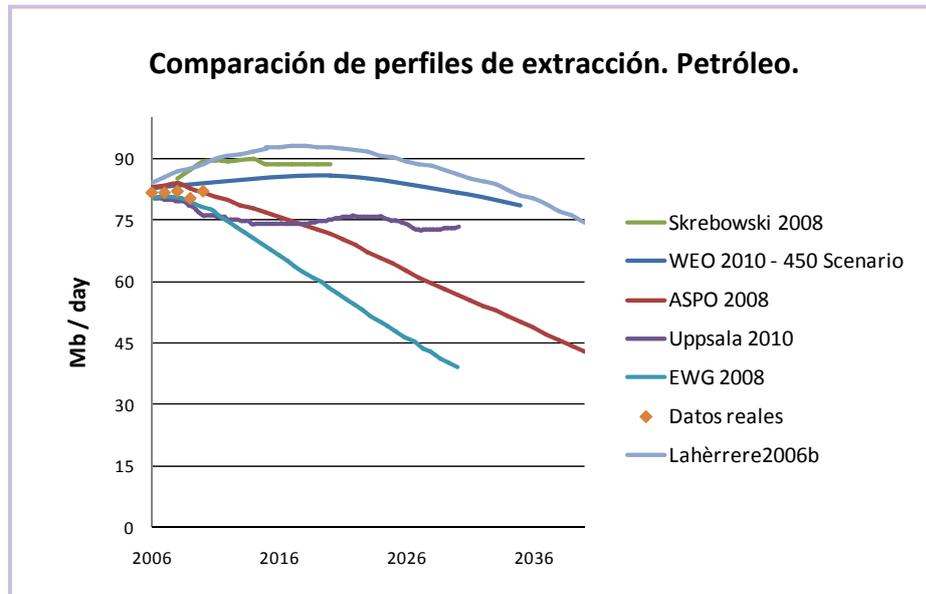


Figura 3: Resumen de las curvas de extracción máxima de petróleo de diversos autores comparadas con los datos históricos (fuente BP).

3.2 Electricidad no renovable

Gas natural

En la figura 4 se pueden ver los resultados de la recopilación de las estimaciones de gas natural (de ASPO 2009, Mohr and Evans 2011, WEO 2010 y Lahèrrere 2006). En la gráfica encontramos que la estimación de ASPO parece estar superada por la demanda histórica (en el gráfico los datos de demanda histórica aparecen como IEA Dry natural gas), probablemente debido a que no ha sido actualizada en los últimos años. Mohr ofrece un rango amplio entre su “low case” y “best guess” mientras que hemos descartado su “high case” por ser exageradamente más alta que el resto de las predicciones. La estimación de Lahèrrere aparece situada entre los dos casos de Mohr. Vamos a tomar esta estimación de Lahèrrere como la más adecuada, descartando la de ASPO y considerando una media entre los dos casos de Mohr.

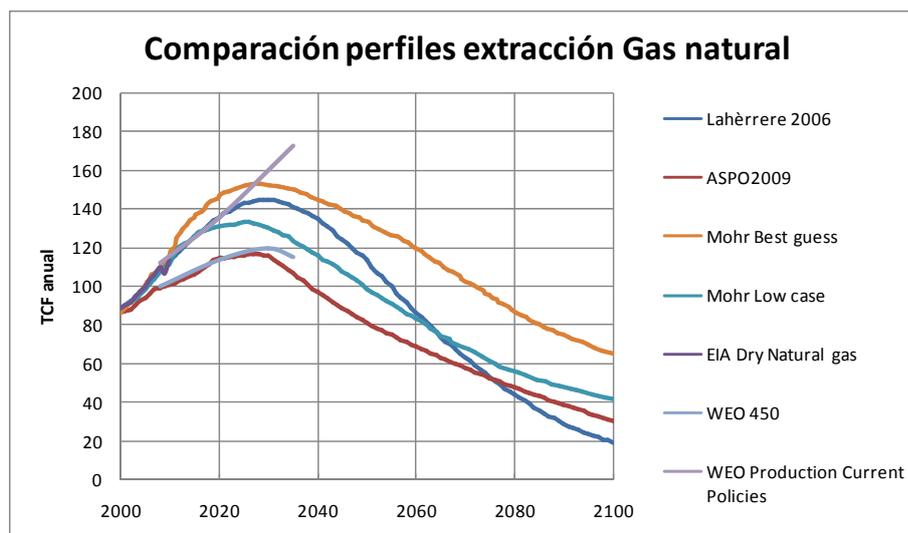


Figura 4: Resumen de las curvas de extracción máxima de gas natural (en función del tiempo) de diversos autores comparadas con los datos históricos (que aparece como EIA Dry Natural Gas, fuente: IEA).

Carbón

En la figura 5 se pueden ver las diferentes estimaciones de extracción de carbón que se han recopilado (EWG 2007, Patzek and Croft 2010, Höök 2009, Mohr and Evans 2009). Nos ha parecido la más acertada la dada por Mohr “high case”, ya que esta estimación toma más en cuenta que otros estudios la naturaleza del carbón (minable). Los estudios sobre el carbón que se basan en curvas logísticas similares a las del petróleo (Patzek 2010) dan lugar a picos de extracción más abruptos y límites de extracción más bajos. Consideramos que la naturaleza mineral del carbón no pone límites tan bajos a la extracción máxima como la naturaleza líquida del petróleo, y por ello, escogemos la estimación de Mohr como la más adecuada.

Uranio

Por último, en la figura 6 se puede ver la curva de extracción de uranio de Energy Watch Group (EWG 2006), utilizaremos los datos de estos autores porque es el único estudio sobre el uranio que ofrece curvas límite que hemos encontrado en la literatura. No consideramos tecnologías ahorradoras de uranio, como las llamadas de cuarta generación. También consideraremos que existen suficientes reactores para utilizar todo el uranio disponible, lo cual, dadas las tendencias actuales de construcción de nuevos reactores, puede ser una suposición optimista (Schneider et al. 2009).

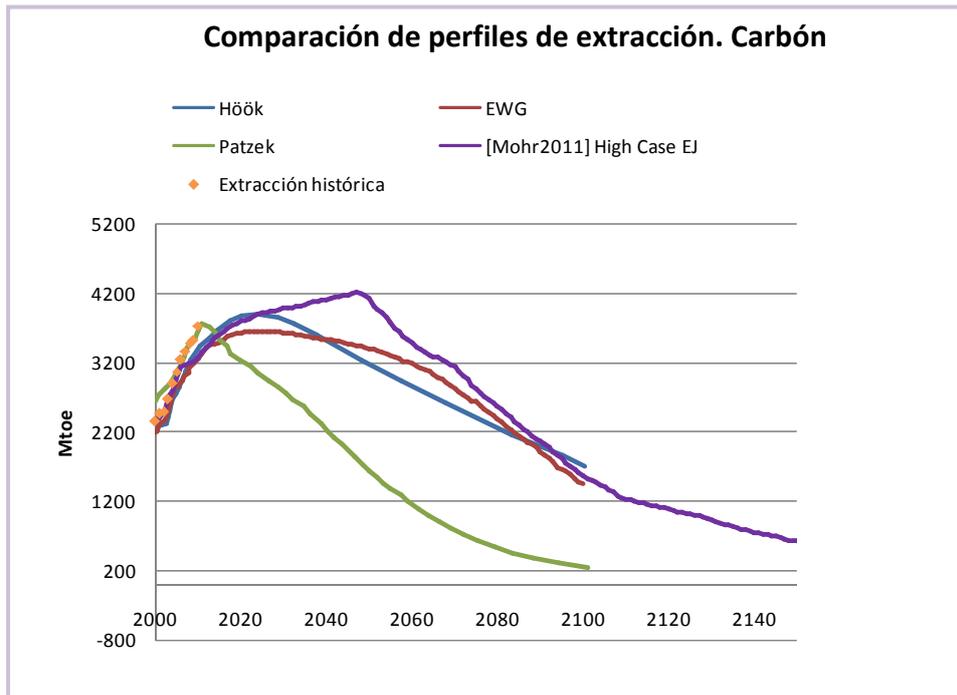


Figura 5: Resumen de las curvas de extracción máxima de carbón de diversos autores comparadas con los datos históricos.

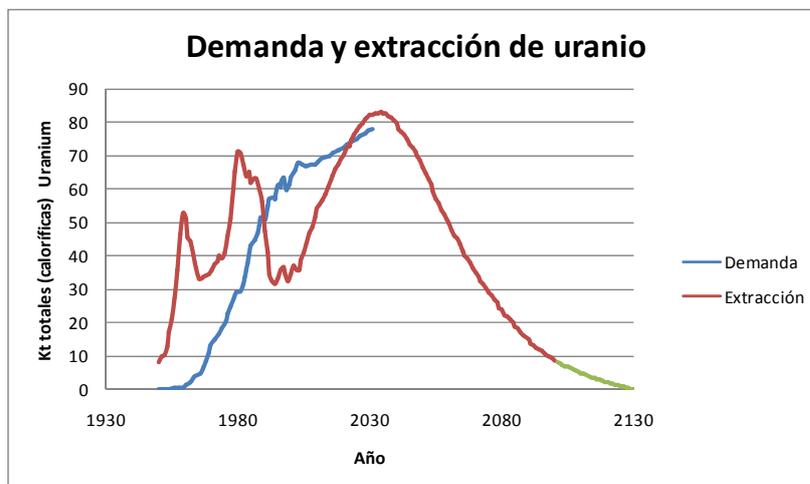


Figura 6: Curva de extracción máxima de uranio y demanda histórica y estimada. Se puede ver que, en las últimas décadas, gran parte de la demanda está siendo cubierta con los stocks de uranio extraídos antes de 1980.

Las estimaciones elegidas para estos tres combustibles se han agregado en una sola curva de extracción máxima en función de las reservas. Esta curva, que puede verse en el anexo 1. Para calcularla hemos tenido en cuenta la conversión de EJ de energía primaria a TWh eléctricos usando las eficiencias actuales, y, en el caso del gas natural y el carbón, descontamos los usos no eléctricos de los

mismos (considerando que la proporción se mantiene similar a la actual en las próximas décadas).

4. La sustitución del petróleo

Como se ha visto en la sección anterior, el petróleo es el recurso energético cuyo declive está más cercano y es muy probable que ya nos encontremos en el pico/meseta de extracción. Los efectos de esta reducción en la oferta de petróleo en el sistema socioeconómico global estarán marcados por la importancia del petróleo en la economía y por las dificultades para implementar políticas de adaptación/mitigación que contribuyan a reducir la demanda.

Una forma de analizar la relación entre economía y petróleo es a través del estudio de la intensidad de petróleo de la economía (cantidad de petróleo consumida por unidad de PIB). En las últimas décadas, la introducción de mejoras tecnológicas y la sustitución del petróleo por otras fuentes de energía, han conducido a una reducción en la intensidad de petróleo de la economía. Es previsible que esta tendencia se mantenga durante los próximos años, sin embargo cada vez será más difícil reducir la intensidad de petróleo.

En los años 70, después de las crisis petroleras, se consiguió disminuir la intensidad de petróleo utilizada por la economía mundial de forma considerable (ver figura 8). Esto se llevó a cabo, en gran parte, sustituyendo el petróleo para generar electricidad por otros combustibles, medida que, en la actualidad, no se puede llevar a cabo ya que la cantidad de petróleo que se destina a producir electricidad es pequeña a escala global.

Los sustitutos tecnológicos más inmediatos al consumo de petróleo en el transporte (el uso más difícil de sustituir) son los biocombustibles y los vehículos eléctrico e híbrido, tecnologías que ya están siendo comercializadas. También se puede esperar una mayor eficiencia mediante mejoras en los motores y cambio a vehículos más ligeros, lo cual es similar a la implantación de híbridos, ya que simplemente corresponde a un menor consumo por automóvil. El vehículo basado en hidrógeno, los combustibles sintéticos, el biogás y alternativas similares no van a ser introducidas en el modelo porque se encuentran todavía en fase de desarrollo. Otras formas de ahorrar petróleo como los cambios en los patrones de movilidad o calefacción, requieren transformaciones sociales más profundas e infraestructuras (y, de momento, tampoco las vamos a introducir).

Biocombustibles

Los biocombustibles son el sustituto más inmediato a los derivados del petróleo, pero poseen importantes inconvenientes. Su tasa de retorno energético ha sido estudiada extensamente y existen estudios muy escépticos al respecto (Field et al. 2008, Triana 2011, Pimentel et al. 2009, Ballenilla 2008, Papong 2010 et al.). Además su ocupación de tierras fértiles es enorme (se estima entre $3.5 \cdot 10^7$ y $11 \cdot 10^7$ ha/Gb, FFT 2011), pero si tomamos las hectáreas dedicadas al cultivo de biocombustibles en 2008 según UNEP 2009, $36 \cdot 10^6$, y los 0.305 Gb equivalentes de petróleo extraídos, el rendimiento real es $11.8 \cdot 10^7$ ha/Gb, ligeramente mayor que la estimación más alta. Aunque se puede esperar una mejora con el avance tecnológico, lo cierto es que los biocombustibles actuales se cultivan en algunas de las mejores tierras del planeta y los límites biofísicos de la fotosíntesis hacen muy complicado una disminución drástica de la ocupación.

Un análisis básico de los datos muestra que, con estos rendimientos, los biocombustibles no pueden convertirse en una alternativa global al petróleo. La sustitución de todo el petróleo actualmente consumido por biocombustibles, con los rendimientos actuales, requeriría $3.54 \cdot 10^9$ ha de tierra, que representan un 232% de las tierras arables disponibles en la actualidad en el planeta. Esto es, a todas luces inviable. Incluso si quisiéramos sustituir únicamente el 60% del petróleo, que es el destinado actualmente a transporte necesitaríamos el 140% de las tierras.

La Agencia Internacional de la Energía propone en su escenario 450 Scenario (WEO 2010), un incremento de producción de biocombustibles de $1.1 \cdot 10^6$ b/d en 2009 a $8.1 \cdot 10^6$ b/d en 2035 (de 0.433 Gb/yr a 3.18Gb/yr). Tomamos este dato como techo máximo para nuestra “política alta” de biocombustibles.

Como “política baja” de biocombustibles usamos la estimación de Field et al. 2007 que afirma que podríamos dedicar $386 \cdot 10^6$ ha de tierras marginales al cultivo de biocombustibles, con una productividad menor que la actual (dada la poca calidad de éstas). Field establece 27EJ de límite de producción neta vegetal, lo cual, una vez descontadas las pérdidas por la transformación a combustibles líquidos y una tasa de retorno energético baja, dada la poca calidad de los cultivos que propone, estimamos en 4.5EJ, es decir 2.53 Gb/yr.

El vehículo eléctrico

La introducción de vehículos eléctricos e híbridos es otra de las posibles formas de sustitución del petróleo. Una de las limitaciones más importantes del vehículo eléctrico son sus bajas prestaciones, sobre todo en términos de capacidad de acumulación de energía: 15 veces menor almacenamiento según FFT 2011, teniendo en cuenta la mayor eficiencia del motor eléctrico y la tecnología de baterías que se puede esperar en la próxima década. Debido a esta poca capacidad de acumulación, sólo son sustituibles por vehículos puramente eléctricos los de menor tonelaje. El transporte de mercancías y el transporte público de viajeros requieren prácticamente la mitad del petróleo destinado a transporte. Eso hace que solamente un 30% del consumo mundial de petróleo pueda ser sustituido por el coche eléctrico.

A pesar de ello, el vehículo eléctrico tiene aspectos positivos. Su consumo de electricidad, por ejemplo, puede ser asumible. Si comparamos las necesidades de energía de vehículos eléctricos respecto a vehículos de gasolina de igual peso y potencia, EABEV 2008 da una relación de 1:3 favorable al eléctrico (tank to wheel). Según este ratio, el consumo de electricidad necesario es 530 TWh por Gb de petróleo sustituido (5.71EJ/Gb).

Otro de los límites que es necesario tener en cuenta a la hora de estudiar el coche eléctrico son los materiales de las baterías. Las baterías que actualmente parecen más prometedoras son las de ion litio y se considera que cada vehículo eléctrico necesitan entre 9 y 15 Kg de litio mineral por vehículo. Las reservas de litio actuales se estiman en $4.1 \cdot 10^9$ Kg, aunque algunos autores (Hacker 2009) llegan a afirmar que son explotables $11 \cdot 10^9$ Kg de litio en el mundo (lo cual es razonable, puesto que el litio es un mineral poco explorado). Angerer 2009 estima que, si el consumo de litio para aplicaciones no relacionadas con el vehículo eléctrico sigue aumentando al ritmo actual, en 2050 se habrán consumido $2 \cdot 10^9$ Kg de litio. Suponiendo que este litio no va a reciclarse, nos quedarían entre $2 \cdot 10^9$ y $9 \cdot 10^9$ Kg para el vehículo eléctrico, lo cual puede mantener un parque de entre 222 y 1000 millones de vehículos, que serían sostenibles si el litio del vehículo eléctrico se reciclase a ratios cercanos al 100%.

Los datos muestran que un número de coches eléctricos mayor que el actual parque de vehículos ligeros puede estar fuera del alcance de esta tecnología, pero un 50%-60% puede ser asumible con importantes políticas de reciclado (o un número mayor si se opta por vehículos más ligeros como las motocicletas). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el vehículo eléctrico no podría sustituir los vehículos pesados, siendo necesarios combustibles sintéticos o vehículos de hidrógeno, o bien cambios importantes en la maquinaria y en la movilidad para cubrir estas necesidades.

En su informe IEA 2009, la Agencia Internacional de la Energía propone un escenario “Blue EV success” que prevé un 57% de los vehículos eléctricos para 2050, un 37% híbridos y un 5.7% de explosión. Vamos a proponer como “política alta” del vehículo eléctrico ésta, ya que es la más favorable desde el punto de vista de sustitución del petróleo de las que propone la IEA. Ponemos el límite de 900 millones de coches eléctricos en circulación (restricción del litio) y asumimos que los vehículos híbridos consumen un 40% menos que los de gasolina (actualmente un 30%).

Esta política la tomamos como optimistas porque el vehículo eléctrico está encontrando importantes dificultades para entrar en el mercado debido a su alto precio y su poca autonomía (Querol 2012). La “política baja” la establecemos arbitrariamente en la mitad de vehículos eléctricos en 2050 (27%) y la misma proporción de híbridos que antes.

5. La sustitución de la energía eléctrica

La sustitución de la electricidad generada con combustibles fósiles es posible a base de tecnologías que se encuentran en explotación, algunas ya maduras. En nuestro modelo hemos considerado, por una parte, la energía hidroeléctrica, que, por ser una tecnología cercana a su saturación, sólo se supone capaz de un crecimiento moderado (hasta doblarse en 2050, como estima WE2008); y las nuevas renovables (eólica, solar fotovoltaica y termoeléctrica), que se suponen capaces de un crecimiento más elevado (ya que su implantación es menor).

Los límites físicos a la implantación de estas energías renovables los establecemos en 2.7TW de potencia real (no potencia instalada) en base al trabajo de Castro 2011 y Castro 2012). Este límite es significativamente menor que el establecido por otros . Asumimos asimismo que estas instalaciones de energía renovable requieren $20 \cdot 10^6$ ha de terreno por TW de potencia total (Castro 2012).

Tomamos un coste medio de instalación de nuevas renovables con estimaciones elevadas, ya que coincidimos en el enfoque de Trainer 2011, que señala que la intermitencia de éstas encarece los costes. En Krewitt 2009 se habla de coste actual de 1370 \$/KW para la eólica, 3480 \$/KW para eólica marina y 6340 \$/KW para termosolar. Tomamos un coste de 6000 \$/KW con 2000 horas útiles al año y estimamos que las nuevas infraestructuras necesarias para la acumulación de la energía suponen multiplicar por 4 estos costes (Trainer 2011).

Tenemos en cuenta también la tasa de retorno energético, ya que estas nuevas instalaciones requieren energía para su construcción. Como no podemos

calcular qué porcentaje de esta energía se consume en forma de petróleo y combustibles líquidos y cuál en forma de energía eléctrica, nos ponemos en el peor de los casos y suponemos que toda la energía demandada es petróleo (el combustible más escaso). La tasa de retorno energético que tomamos es 8 (Heinberg 2009 y Hall 2009, por ejemplo, estiman retornos mayores).

Es preciso destacar que los datos que estamos tomando para la ocupación de terreno, coste, tasa de retorno energético y límite físico de estas tecnologías son de los más bajos que se encuentran en la literatura. Estamos, por tanto, siendo mucho más pesimistas respecto a las posibilidades de estas tecnologías que respecto al vehículo eléctrico y los biocombustibles. De esta forma, los resultados básicos del modelo resultan más evidentes, como se podrá comprobar en la sección siguiente.

Las políticas de implementación de energía renovable que hemos tomado son sencillas. Tomamos un porcentaje de crecimiento fijo (8%-9.5%) menor que el de los últimos años, que se ha acercado al 30% anual. Por simplicidad, el crecimiento de las renovables se hace independiente de la demanda y la escasez y damos prioridad a las renovables en el consumo frente a las no renovables.

6. El crecimiento económico mundial y la demanda de energía.

La energía es un elemento esencial en para el funcionamiento de la sociedad, es por esto que cualquier restricción en la cantidad de energía disponible puede llegar a tener importantes efectos socioeconómicos. El PIB constituye un indicador agregado del valor de mercado de los bienes y servicios producidos. Por tanto, y dado la estrecha relación entre consumo de energía y actividad económica, en nuestro modelo utilizaremos el PIB como variable proxy del nivel de actividad económica y así estimar la demanda energética.

En la figura 8 se pueden ver el consumo de petróleo y de electricidad mundial en función del PIB de los últimos años. Se puede observar que la relación electricidad-PIB es prácticamente lineal, mientras que la gráfica petróleo-PIB presenta una clara ruptura coincidiendo con la crisis petrolera de los años 70 que propició un proceso de sustitución del petróleo en la generación de electricidad y en determinados usos industriales, y un mejora en la eficiencia del motor de explosión.

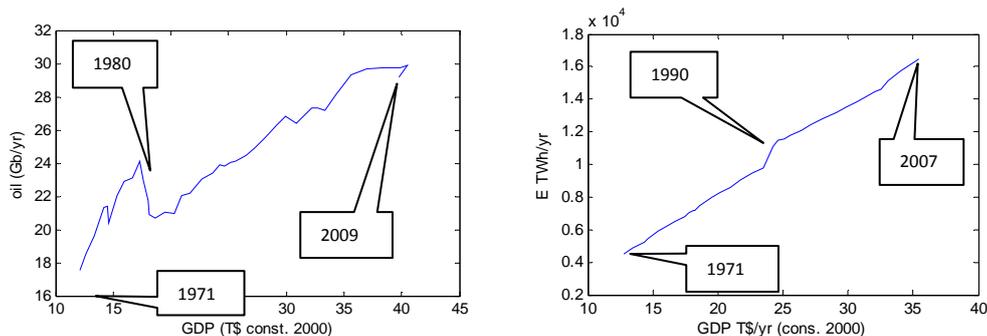


Figura 8: Extracción de petróleo mundial en función del PIB (izquierda) y consumo de electricidad mundial en función del PIB (dcha).

La demanda futura de petróleo va a venir determinada por la interacción entre el nivel de actividad económica potencial (exógeno en nuestro modelo) y la intensidad de petróleo de la economía. Suponemos que la intensidad de petróleo mundial tiene forma de una curva que decrece exponencialmente con el tiempo (exponential decay). Es decir, a medida que pasa el tiempo, el progreso tecnológico hace que la intensidad de petróleo de la economía disminuya, pero las reducciones en la intensidad energética son cada vez menores.

La ecuación de la intensidad de petróleo de la economía vendría determinada por la siguiente expresión:

$$oil_intensity = a * t - b \quad eq (1)$$

Donde, *oil_intensity* es la intensidad de petróleo de la economía medida en Gbarriles de petróleo por millones de millón de dólares US (T\$) de PIB a precios constantes de 2000, *t* es el tiempo medido en años, *a* el valor inicial de la intensidad y *b* la tasa de decrecimiento de la intensidad.

Para la estimación de los parámetros *a* y *b* de la ecuación (1) hemos utilizado el PIB mundial a precios constantes (World Bank) y la extracción mundial de petróleo (BP 2011). La ecuación de la intensidad energética estimada en base a estos datos sería:

$$Intensity_oil/GDP = 1e-3 * exp[7.3698 + - 0.1869 \ln(t-1978)] \quad Eq (2)$$

En este modelo la evolución de la intensidad de petróleo de la economía depende únicamente del tiempo. Sería conveniente refinar el modelo para incluir otras variables como los precios que no se han tenido en cuenta debido a que haría mucho más complejo el modelo. Según la teoría económica, el incremento en los precios del petróleo provocaría que fuese más atractivo invertir en nuevas tecnologías que favorecerían una reducción de la intensidad. Sin embargo, un aumento continuado de los precios conduciría a una recesión y la subsecuente

caída de los precios, de forma que las nuevas tecnologías dejarían de ser atractivas y el proceso de reducción en la intensidad de petróleo se detendría.

En la figura 9 se pueden comparar los datos históricos de consumo de petróleo con la estimación dada por la ecuación (2) (demand_oil_initial). Se puede ver que, desde el año 2004 existe una importante disparidad entre la producción de petróleo (oil_reales_prod) y el consumo (oil_reales_cons), que se debe a diversos factores como las ganancias en las refinerías y las variaciones de stocks. También se puede ver en la gráfica que la adición de otros líquidos como los biocombustibles (liquids_and_EVhyb) aumenta ligeramente la oferta. A pesar de todo, a partir del año 2005 se nota una disparidad entre la demanda que hemos estimado en base a las tendencias de las décadas pasadas y la producción real. Esto se debe a que, como se ha observado en la figura 3, se ha notado estos últimos años un estancamiento de la oferta de petróleo que ha roto las tendencias de crecimiento de décadas anteriores.

Por último, la demanda de electricidad se ha calculado en base a una estimación de intensidad energética que, en este caso, ha resultado ajustar a una constante.

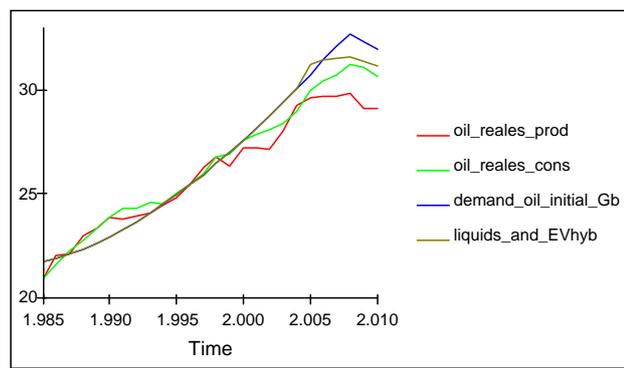


Figura 9: comparación de la estimación de la demanda de petróleo dada por la ecuación 2 (demand_oil_initial), con la producción histórica (oil_reales_prod) y el consumo (oil_reales_cons). Liquids_and_EVhyb suma a la producción los biocombustibles y las ganancias en refinerías.

7. Escenarios y resultados

Todos los datos expuestos en las secciones anteriores se han introducido en el modelo dinámico. Además, debemos introducir a partir de 2011, las políticas que hemos dejado como entradas a elegir por el usuario y que son las siguientes:

- Crecimiento económico
- Ritmo de implantación del vehículo eléctrico
- Límite máximo de biocombustibles
- Ritmo de implantación de nuevas renovables

Variando estas políticas iremos formando los diferentes escenarios. El modelo nos servirá para tratar de responder a algunas preguntas:

- ¿Es posible continuar con el crecimiento económico y los patrones de consumo de las décadas pasadas confiando en una adaptación al pico del petróleo basada en la sustitución tecnológica?
- ¿Qué crecimiento económico sería posible si no cambiamos la relación petróleo-economía y qué cambios necesitaríamos para superar el pico del petróleo?
- ¿Cuándo encontraremos problemas con el suministro de energía eléctrica?
- ¿Qué limitaciones existen para la transición hacia una generación de electricidad 100% renovable?

Escenario 1: “business as usual”

En primer lugar vamos a ver cómo se comporta el modelo si intentamos continuar con el crecimiento económico de pasadas décadas sin cambiar significativamente los patrones de consumo (la intensidad energética continua su descenso tendencial) y apostando fuertemente por los biocombustibles y el vehículo eléctrico.

Suponemos una política optimista para los biocombustibles y el coche eléctrico, la electricidad renovable tiene un crecimiento bajo (8% anual fijo). Usamos dos estimaciones para el petróleo: la de ASPO (declive) y la de Upsala (meseta hasta 2030). Damos prioridad a las renovables frente a las no renovables en la generación de electricidad.

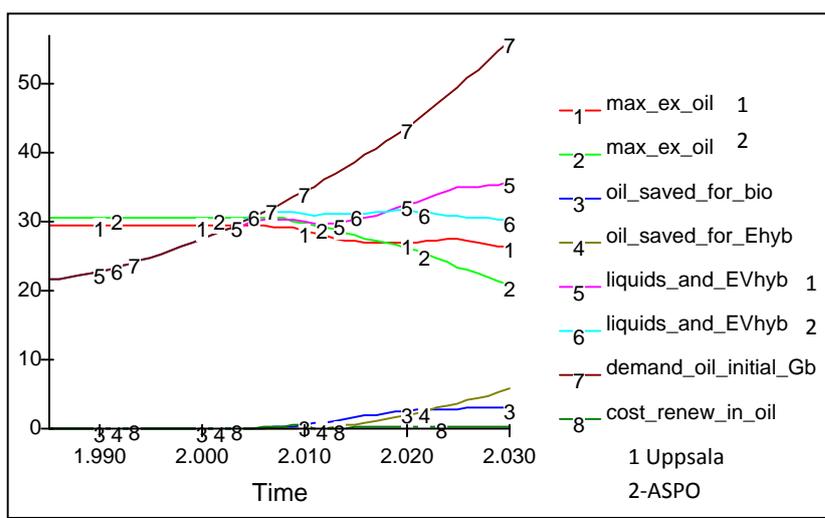


Figura 11: Petróleo. Escenario 1: “business as usual”. El crecimiento económico y los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles con políticas altas. Crecimiento bajo de la energía renovable. demand_oil_initial_Gb es la demanda de petróleo, liquids_and_EVhyb la oferta de petróleo+ combustibles líquidos+ a petróleo ahorrado con el vehículo eléctrico e híbrido, oil_saved_for_E y oil_saved_for_bio es el petróleo equivalente ahorrado con vehículo eléctrico-hib. y biocombustibles, max_ex_oil es la extracción máxima de petróleo estimada por las curvas de ASPO y Uppsala. Cost renew in oil es la energía necesaria para construir las instalaciones de energías renovables expresado en unidades de petróleo. Todas las cantidades en Gbarries equivalentes de petróleo al año.

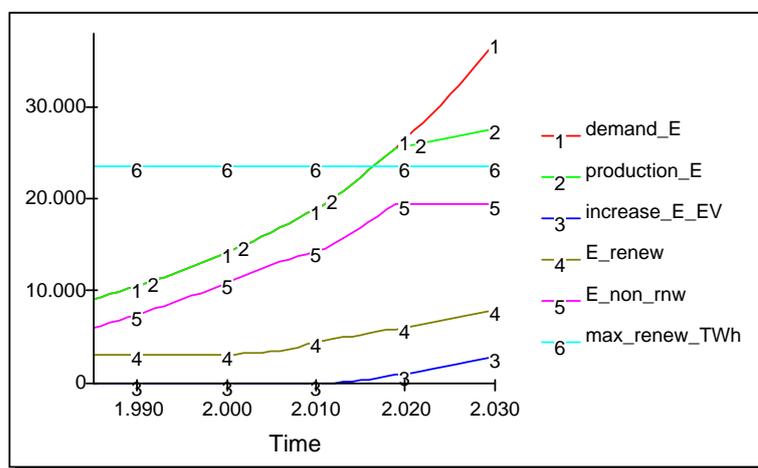


Figura 12: Electricidad. Escenario 1: “business as usual”. El crecimiento económico y los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles con políticas altas. Crecimiento bajo de la energía renovable (8%). demand_E es la demanda de energía eléctrica, production_E la producción total, increase_E_EV el incremento de energía eléctrica debida al vehículo eléctrico, E_renew la generación de electricidad renovable, E_non_rnw la electricidad no renovable, max_renew_TWh el máximo teórico de la energía renovable. Todas las cantidades en TWh producidos al año.

Los resultados de las gráficas 11 y 12 muestran claramente que **este escenario es imposible**, ya que la demanda de petróleo es muy superior a la oferta. Incluso utilizando las políticas más optimistas de sustitución del petróleo por biocombustibles y vehículos eléctricos, y teniendo en cuenta las estimaciones de los autores que hemos utilizado, no se puede continuar con el crecimiento económico y los patrones de consumo de las décadas pasadas. La electricidad no muestra límites tan inmediatos, pero, si el consumo sigue incrementando, en 2020 el modelo muestra problemas para cubrir la demanda, porque se alcanza el techo máximo de las no renovables y la demanda supera también el límite teórico de las energías renovables. El vehículo eléctrico representa un aumento del consumo eléctrico importante, pero no excesivo. La inversión en energías renovables llega a ser un 0.14% del PIB en 2030 ($110 \cdot 10^9 \$$) y, se puede ver en la figura 11 que el coste energético de construcción de centrales de generación de electricidad renovable (derivado de la TRE) es pequeño comparado con el consumo de petróleo.

La conclusión que el modelo muestra en este primer escenario es clara: *si las estimaciones de declive de recursos que hemos utilizado son correctas y la intensidad energética no disminuye de forma mucho más acusada de lo que ha venido haciendo, no va a ser posible continuar con el crecimiento económico de décadas anteriores. Se van a necesitar en esta misma década ahorros significativos de petróleo que van mucho más allá de la sustitución técnica.*

Escenario 2: estimaciones altas

Veamos ahora cómo se comporta el modelo con un crecimiento económico que pueda ajustar oferta y demanda de petróleo, utilizando las políticas más altas. Para ello hemos necesitado, en este segundo escenario, establecer el crecimiento económico en un 0.2%.

Suponemos una política alta para los biocombustibles y el vehículo eléctrico y establecemos para las energías un crecimiento bajo (8% anual fijo). Usamos dos estimaciones para el petróleo: la de ASPO (declive) y la de Upsala (meseta hasta 2030).

En la figura 13 se puede ver que, si hacemos que el crecimiento económico se sitúe en un 0.2% y tomando la curva de petróleo de Upsala, la oferta (de todo tipo de líquidos) y la demanda consiguen coincidir, después de unos años de desajuste. Esto no sucede con la curva de ASPO, que decrece más rápidamente que la demanda.

En la figura 14 se puede ver el panorama de la energía eléctrica. Tanto la electricidad renovable como la no renovable crecen a un ritmo moderado y no hay problemas de suministro hasta 2050 (si se dejase de invertir abruptamente en energías renovables se encontrarían problemas para cubrir la demanda en 2030). Como el crecimiento es menor que en el escenario 1, la inversión en energías renovables llega a suponer un 0.52% del PIB mundial en 2030 ($220 \cdot 10^9$ \$).

Este escenario nos muestra que, incluso con políticas de sustitución optimistas, va a ser difícil superar un estancamiento de la economía. Si ASPO tiene razón y nos enfrentamos a un declive de la producción de petróleo y no a una meseta, los biocombustibles y el vehículo eléctrico nos podrían servir hasta 2020 para posponer el decrecimiento, pero únicamente sería una solución parcial para pocos años que está lejos de evitar el declive. En este escenario, en 2030, el petróleo sustituido por el vehículo eléctrico y por los biocombustibles es similar, pero las hectáreas ocupadas por los biocombustibles son $371 \cdot 10^6$ frente a $7.6 \cdot 10^6$ de la electricidad necesaria para el vehículo eléctrico. Los biocombustibles ocupan casi 50 veces más tierra que el vehículo eléctrico, y no cualquier terreno, sino tierra fértil.

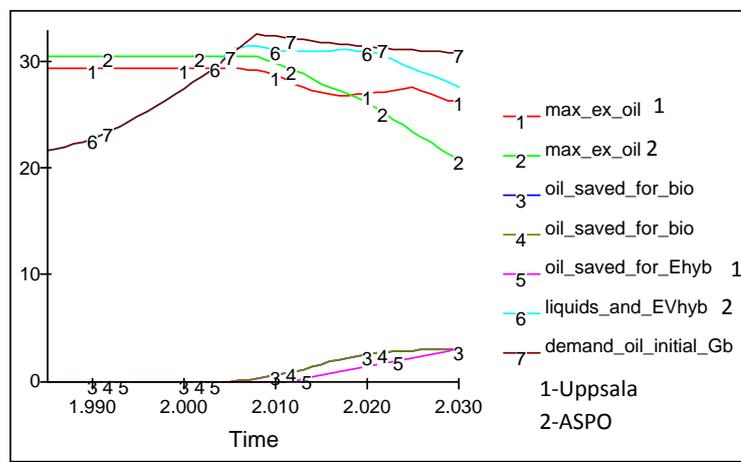


Figura 13: Petróleo. Escenario 2: estimaciones altas. El crecimiento económico es un 0.2% y los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles tienen políticas altas. Crecimiento bajo de la energía renovable. demand_oil_initia_Gb es la demanda de petróleo, liquids_and_EV la oferta de petróleo+combustibles líquidos+ ahorrado con el vehículo eléctrico ehirido, oil_saved_for_E y oil_saved_for_bio es el petróleo equivalente ahorrado con vehículo eléctrico y biocombustibles, max_ex_oil es la extracción máxima de petróleo estimada por las curvas de

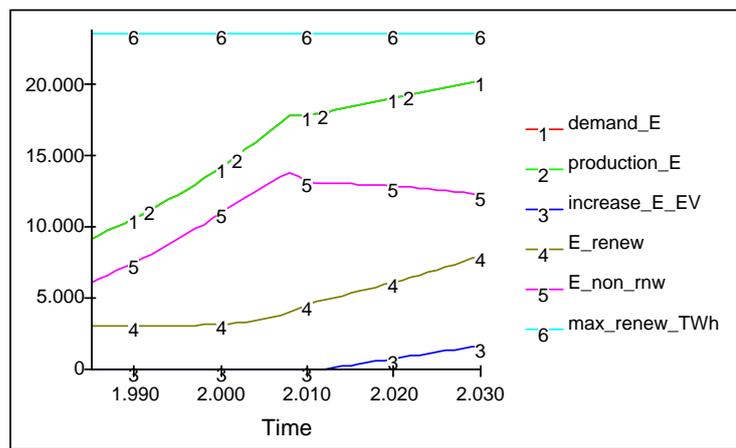


Figura 14: Electricidad. Escenario 2: estimaciones optimistas. El crecimiento económico es un 0.2%, los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles con políticas altas. Crecimiento bajo de la energía renovable (8%). demand_E es la demanda de energía eléctrica, production_E la producción total, increase_E_EV el incremento de energía eléctrica debida al vehículo eléctrico, E_renew la generación de electricidad renovable, E_non_rnw la electricidad no renovable, max_renew_TWh el máximo teórico de la energía renovable. Todas las cantidades en TWh producidos al año.

Escenario 3: estimaciones bajas

Veamos ahora cómo se comporta el modelo con políticas bajas del vehículo eléctrico y biocombustibles y energías renovables que siguen un crecimiento un poco mayor (10%). Buscamos un crecimiento económico que pueda ajustar oferta y demanda de petróleo, para ello hemos necesitado establecer un crecimiento económico negativo (-0.5% aproximadamente). Con este decrecimiento se puede ver que, después de unos años de transitorio en los que la demanda es mayor a la oferta (porque ya lo está siendo estos últimos años que hemos abandonado las tendencias), oferta y demanda casan de forma aproximada. *Este escenario nos muestra que entra dentro de lo posible que la economía mundial sufra un severo declive si no somos capaces de superar el pico del petróleo.*

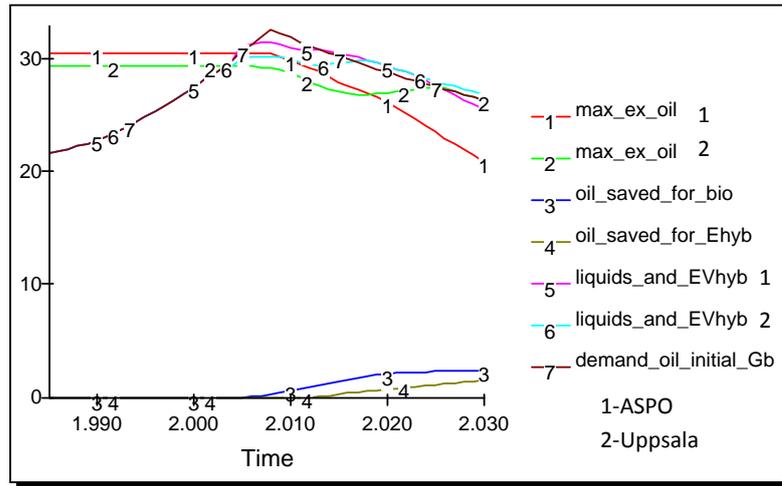


Figura 15: Petróleo. Escenario 3: estimaciones bajas. El crecimiento económico es -0.5% (decrecimiento) y los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles tienen políticas bajas. Crecimiento moderado de la energía renovable. demand_oil_inicia_Gb es la demanda de petróleo¹, liquids_and_EV la oferta de petróleo, combustibles líquidos sumada a petróleo ahorrado con el vehículo eléctrico, oil_saved_for_E y oil_saved_for_bio es el petróleo equivalente ahorrado con vehículo eléctrico y biocombustibles, max_ex_oil es la extracción máxima de petróleo estimada por las curvas de ASPO y Uppsala. Todas las cantidades en Gbarries equivalentes de petróleo al año.

En la figura 16, en la cual hemos alargado el horizonte temporal hasta 2050, se puede ver el panorama de la electricidad. La figura 16 muestra que, en este escenario en el cual la demanda de electricidad disminuye ligeramente respecto al consumo actual, un 10% de aumento anual de las energías renovables es suficiente para cubrir el 100% de la demanda eléctrica. La inversión en energías renovables llegaría, en este caso, a un máximo de $542 \cdot 10^9$ \$ anuales en 2050, un 1.7% del PIB mundial.

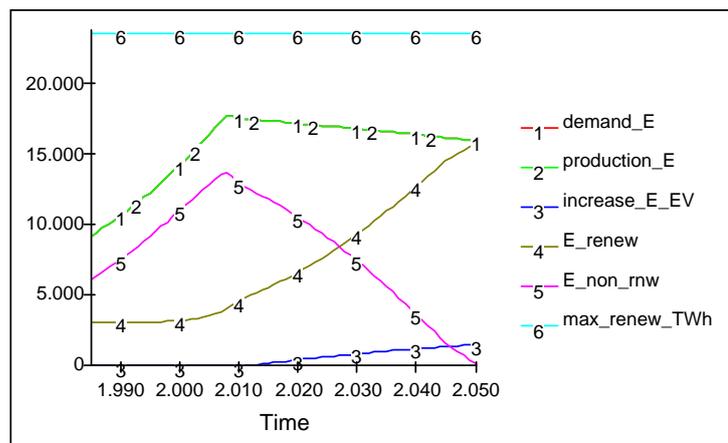


Figura 16: Electricidad. Escenario 3: estimaciones bajas. El crecimiento económico es -0.5%, los patrones de consumo siguen igual que en las décadas pasadas. Vehículo eléctrico y biocombustibles con políticas bajas. Crecimiento moderado de la energía renovable (10%). demand_E es la demanda de energía eléctrica, production_E la producción total, increase_E_EV el incremento de energía eléctrica debida al vehículo eléctrico, E_renew la generación de electricidad renovable, E_non_rnw la electricidad no renovable, max_renew_TWh el máximo teórico de la energía renovable. Todas las cantidades en TWh

8. Discusión sobre el modelo

Todo modelo es una simplificación de la realidad y éste, al intentar ofrecer una panorámica global de la energía, incluye, como es lógico, simplificaciones muy importantes.

El modelo está pensado para estudiar si es posible una reacción a corto plazo ante el agotamiento de combustibles fósiles y, por ello, se ha centrado en las políticas y tecnologías más disponibles en el momento. Sin embargo, para estudiar con detalle la transición energética, sería preciso estudiar todo tipo de políticas a medio o incluso largo plazo. Entre ellas se podrían destacar la utilización de gas natural en el transporte, los combustibles sintéticos, el biogás procedente de residuos y las políticas de ahorro y eficiencia.

Tampoco se han estudiado con detalle muchas políticas de electrificación de consumos energéticos que ahora dependen del petróleo. Esto hace que, en nuestro modelo, el consumo de energía eléctrica no aumente significativamente y la demanda de energía eléctrica sea baja. Ante el declive del petróleo, es previsible un aumento del consumo de energía eléctrica mayor que el que nosotros estimamos, por ejemplo, es muy sencillo sustituir el petróleo usado en calefacción por electricidad, aunque el coste económico es elevado. Esto cambiaría algunos resultados de este modelo, en especial haría significativamente mayor el consumo eléctrico, que es bajo en nuestros escenarios. Si la demanda eléctrica aumenta, el techo de la electricidad no renovable se alcanzaría antes y el papel de las energías renovables sería mucho más relevante. También sería deseable modelar el problema de la variabilidad y almacenamiento de las renovables.

En este estudio hemos simplificado mucho la economía mundial, utilizando únicamente una función de intensidad energética agregada. Sería deseable un análisis por regiones o sectores, ya que es posible que el crecimiento sea desigual y algunos países o regiones todavía sean capaces de crecimiento económico frente al declive del petróleo. Sería deseable introducir una realimentación entre energía y economía, aspecto muy sensible en el modelo y que debe ser estudiado con cuidado.

El modelo no es capaz de hacer predicciones a largo plazo, pero sí hay un hecho que pone en evidencia: entre 2020 y 2100 vamos a poder tener una época en la cual convivan todavía recursos energéticos fósiles mientras se desarrollan en mayor o menor medida las infraestructuras de energía renovable. Esto puede permitir un desarrollo de la demanda de energía por encima de las posibilidades de generación de energía renovable, lo cual nos llevaría a una nueva situación de escasez y posible colapso cuando el pico de todas las energías fósiles ocurriera.

Sería deseable que la humanidad planificara esta transición intentando acomodarse a los límites de la energía que el planeta puede proporcionar de forma sostenible.

9. Conclusiones

El modelo presentado en este artículo está basado en una estructura dinámica sencilla pero que permite tomar algunos de los datos relevantes del panorama energético mundial y estudiar conjuntamente su evolución. Pese a su simplicidad, permite extraer algunas conclusiones con bastante claridad.

La conclusión más clara que se extrae del modelo es que, según las estimaciones de los expertos que se han utilizado, el pico del petróleo va a ser la primera restricción a la que nos enfrentamos y no va a ser sencillo superarla con las tecnologías actualmente disponibles. Ni los biocombustibles ni las energías renovables ni los vehículos eléctricos ofrecen soluciones válidas a gran escala y a medio plazo.

Debido a esto, los patrones de consumo, producción y crecimiento económico de las décadas anteriores no van a poder mantenerse y, si las políticas que hemos definido como bajas y las previsiones de los expertos menos halagüeñas resultan ser acertadas, podemos encontrarnos con recesiones económicas continuadas. Superar el declive del petróleo requiere cambios en la intensidad energética muy superiores a los experimentados en décadas pasadas.

Los vehículos eléctricos pueden ser una alternativa parcial al petróleo, pero están limitados por sus bajas prestaciones y su dependencia de elementos químicos escasos. Los biocombustibles son una alternativa mucho peor, ya que su ocupación de tierras es 50 veces mayor. Superar el declive del petróleo va a requerir cambios estructurales: infraestructuras de transporte público, cambio de modelo agrícola, cambio de patrones de producción y consumo, políticas de ahorro, etc.

La sustitución de la energía eléctrica de origen fósil y nuclear por energías renovables parece más sencilla, porque los picos del gas natural y el carbón no son tan inminentes y las tecnologías de electricidad renovable están más desarrolladas. Si la economía mundial se estanca debido al pico del petróleo y también lo hace la demanda de electricidad, un crecimiento moderado de las renovables permitiría cubrir gran parte de la demanda y ayudaría a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto, sin embargo, parece difícil en una economía de mercado como la actual, porque hablaríamos de inversiones

importantes en una época de recesión y habiendo todavía energía fósil disponible.

El modelo está pensado únicamente para dilucidar hasta qué punto es posible continuar la tendencia de pasadas décadas y no pretende predecir el futuro energético o económico, por ello hay muchos aspectos que no han sido tenidos en cuenta. Se necesitaría un modelo más complejo para estudiar las políticas energéticas globales. Sin embargo, las conclusiones extraídas de este estudio ponen en evidencia que hay motivos para pensar que estamos tocando el primero de los límites al crecimiento (Meadows et al. 1972). Esto debería servirnos para afrontar seriamente el problema de la insostenibilidad estructural de nuestra sociedad sin caer en la tentación de aplicar parches que están lejos de ser soluciones reales a los problemas.

References

Aleklett, K., Höök, M., Jakobsson, K., Lardelli, M., Snowdene, S. y Söderbergh, B. 2009. "The Peak of the Oil Age - analyzing the world oil production Reference Scenario in World Energy Outlook 2008", Energy Policy. Volume 38, Issue 3, March 2010, Pages 1398-1414.

BP Statistical Review of World Energy 2011. <http://www.bp.com/statisticalreview>

D'Alessandro, S, Luzzati, T. and Morroni, M. 2010. "Energy transition towards economic and environmental sustainability: feasible paths and policy implications" Journal of Cleaner Production 18 (2010) 291–298

Offer, G. J, Howey, D. Contestabile, M., Clague, R. and Brandon, N. P. 2010. "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system". Energy Policy, 38(2010)24–29, 2010.

Angerer, G. 2009. "Raw materials for emerging technologies, The case of Lithium". Conference Eco-efficient Economy Seminar on Raw materials –A scarce resource in a sustainable world. Linköping, 3 November 2009

ASPO, 2008. ASPO Newsletter no95. November 2008. <http://www.aspo-ireland.orgwww.aspo-ireland.org>.

ASPO, 2009. ASPO Newsletter no100. April 2009. <http://www.aspo-ireland.orgwww.aspo-ireland.org>.

Ballenilla, M. 2007. "Biocombustibles: mito o realidad". Prácticum, Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad de Elche.

Bowyer 2010 , C. "Anticipated Indirect Land Use Change Associated with Expanded of Biofuels and Bioliquids in the EU – An Analysis of the National Renewable Energy". Institute for European Environmental Policy, November 2010.

Campbell, C.J., Laherrère, J.H., 1998. "The end of cheap oil". Scientific American, 78–83.

Field, C. , Campbell, J. and Lobell, D. 2007. "Biomass energy: the scale of the potential resource". Trends in Ecology and Evolution Vol.23 No.2, 2007.

Castro, C., et al., 2008. "World energy–economy scenarios with system dynamics modelling". VII annual international ASPO conference. October 2008. Barcelona, Spain

Castro. C. 2009 (b), "Escenario de energía-economía mundiales con modelos de dinámica de sistemas". Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 2009. (<http://www.eis.uva.es/energiasostenible>)

Castro, C. Miguel, L.J., Mediavilla, M. 2009. "The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil" Energy Policy, Vol. 37, no.5, May 2009, 1825-1833

Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L.J., Frechoso, F. 2011. "Global wind power potential: Physical and technological limits". Energy Policy, Vol. 39, Issue 10, 6677-6682, October 2011.

Castro, C. 2012. Global solar electric power potential: technical and ecological limits. (<http://www.eis.uva.es/energiasostenible>)

Dale, M. Krumdieck, S. and Bodger, P. 2012. "Global energy modelling — A biophysical approach (GEMBA)" Ecological Economics, 72(2012) 152-157.

EABEV 2008. European Association for battery electric vehicles. "Energy consumption, CO2 emissions and other considerations related to Battery Electric Vehicles", 2008, www.going-electric.org.

EEA Report no 3/2009, "Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union". European Environment Agency.

EWG 2007, Energy Watch Group report. "Coal: resources and future production". EWG-Paper No. 1/2007.

EWG 2006, Energy Watch Group report 2006. "Uranium resources and nuclear energy". EWG-Series No 1/2006.

EWG 2008, Energy Watch Group report 2008: "Crude Oil: The Supply Outlook".

Fiddaman, T.S., 1997. "Feedback Complexity in Integrated Climate—Economy Models", PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

FTF 2011. "Future Transport Fuels". Report of the European Expert Group on Future Transport Fuels, January 2011.

García, D. 2009. "A New World Model Including Energy and Climate Change Data". First International Workshop Mission Earth, Modeling and simulation for a sustainable future, AGSME - Jan. 26, 2009 Zurich (europe.theoil drum.com/node/5145).

- Guseo, R. 2011, "Worldwide cheap and heavy oil productions: A long-term energy model", *Energy Policy*, 39(2011) 5572-5577
- Hacker, F., Harthan, R., Matthes, F. and Zimmer, W. 2009. "Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe - Critical Review of Literature" - ETC/ACC Technical Paper 2009/4, July 2009.
- Hall, C., Balogh, S. and Murphy, D., 2009. "What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?". *Energies* 2009, 2, 25-47.
- Höök, M. 2009, "Depletion and Decline Curve Analysis in Crude Oil Production", Licentiate thesis Mikael Höök Global Energy Systems Department for Physics and Astronomy, Uppsala University, May 2009.
- Hubbert, M.K.,1982. "Techniques of prediction as applied to production of oil and gas". US Department of Commerce. NBS Special Publication 631,pp.1-121.
- IEA 2009, International Energy Agency. "Transport, energy and CO₂, movign toward sustainability".
- IEO 2010. International Energy Outlook, April 2010.
- IIASA, 2001. "User's Guide for MESSAGE III, WP-95-69", International Institute for Applied Systems Analysis. Austria,2001.
- IIASA, 2004. Schrattholter,L.,etal., "Achieving a sustainable energy system". IIASA, Edward Elgar,UK.
- Krewitt. W., Teske, S., Simon, S. Pregger, T. Graus, W., Blomen, E., Schmid, S, Schäfer, O. 2009. "Energy [R]evolution 2008—a sustainable world energy perspective" . *Energy Policy*, 37 (2009), 5764-5775.
- Kopelaar,R.,2005. "World oil production and peaking outlook". Peak oil Netherlands Foundation.
- Lahèrre, J., 2006. "Oil and gas: waht future?". Groningen annual Energy Convention 21 November 2006
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., and Berhens 111, W. W. 1972. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books. [Republished by Productivity Press, Portland, OR].
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. 1992. *Beyond the Limits*. Post Mills, Vermont: Chelsea Green Publishing Company
- Mediavilla, M., Miguel, L.J. and Castro, C 2011. "Analysis of the energetic transition: the electric car", 9th International Conference of the European Society for Ecological Economics, Istambul, june 14-17 2011.
- Miller, L. M., Gans, F. and Kleidon, A. 2011. "Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences". *Earth Syst. Dynam.*, 2, 1-12, 2011.
- Mohr, S. and Evans, G. 2009 "Forecasting coal production until 2100". *Fuel* 88 (2009) 2059-2067
- Mohr, S. and Evans, G. 2011. "Long term forecasting of natural gas production". *Energy Policy*, 39(2011), 5550-5560.

Offer, G. J, Howey, D. Contestabile, M., Clague, R. and Brandon, N. P. 2010. "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system". *Energy Policy*, 38(2010)24–29, 2010.

Papong 2010. Papong, S. , Chom-In, T. ,Noksa-nga S. and Malaku, P. "Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production from palm oil in Thailand". *Energy Policy*38(2010)226–233.

Patzek, T. and Croft 2010, G. "A global coal production forecast with multi-Hubbert cycle analysis". *Energy* 35 (2010) 3109-3122

Pimentel, D., Marklein, A., Thoth, M., Karpoff, M., Paul, G., McCormack, R., Kyriazis, J. and Krueger, T. "Food Versus Biofuels: Environmental and Economic Costs". *Human Ecol.*DOI 10.1007/s10745-009-9215-8.

Querol, R. 2012, "La industria baja los humos al coche eléctrico" *El País* Edición impresa, 5 de enero 2012

Robelius,F.,2007." Giant Oil Fields—The Highway to Oil. Giant Oil Field sand their Importance for Future Oil Production". *Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science andTechnology. University of Uppsala.*

Schneider, M., Thomas, S., Froggatt, A. and Koplow, D. 2009. "The World Nuclear Industry Status Report 2009", Commissioned by German Federal Ministry of Environment, Nature Conservation and Reactor Safety.

Skrebowski,C. 2008. "Entering the foothills of peak oil". VII annual international ASPO conference. October20–212008. Barcelona, Spain.

Skrebowski,C. 2010 "The Oil Crunch A wake-up call for the UK economy",Industry Taskforce on Peak Oil & Energy Security (ITPOES) February 2010.

Tao, Z. and Li, M. 2007. "What is the limit of Chinese coal supplies?"—A STELLA model of Hubbert Peak, *Energy Policy* 35 (2007) 2281–2286

Trainer 2011, A critique of Jacobson and Delucchi's proposals for a world renewable energy supply. *Energy Policy* (2011), doi:10.1016/j.enpol.2011.09.037.

Triana, C. 2011."Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches". *Energy Policy*, 39(2011), 4605-4613.

UE 2010, Comisión Europea, "Informe de la Comisión sobre el cambio indirecto del uso de la tierra en relación con los biocarburantes y biolíquidos". Bruselas,COM(2010) 811 final.

UKERC 2009, UK Energy Research Centre (2009): "Global Oil Depletion. An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production", Technical Report 7, Londres, 228 pp. <http://energypapers.com/node/1964>

UNEP 2009. Towards sustainable production and use of resources: assessing biofuels.2009, (www.unep.fr).

WEO 2008, World Energy Outlook, International Energy Agency.

WEO 2010, World Energy Outlook, International Energy Agency.

WETO, 2003. "World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030". Directorate-General for Research Energy, European Commission.

WBGU 2008, German Advisory Council on Global Change. "Future Bioenergy and Sustainable Land Use". WBGU, Berlin 2009.

Anexo 1: Integración de las curvas de recursos

Las curvas de extracción máxima de recursos energéticos en función del tiempo se han transformado en curvas de extracción máxima en función de los recursos.

En estas curvas, mientras los recursos son grandes, la extracción no está físicamente limitada y la hacemos igual a la extracción máxima total; cuando los recursos se hacen menores, empiezan a aparecer límites físicos y la extracción se hace menor. De esta forma, el modelo utiliza un stock de recursos (basado en la URR que toma cada autor) y se tiene en cuenta cómo este stock se va vaciando en función de la demanda y la extracción máxima. En la figura A2 se puede ver un ejemplo.

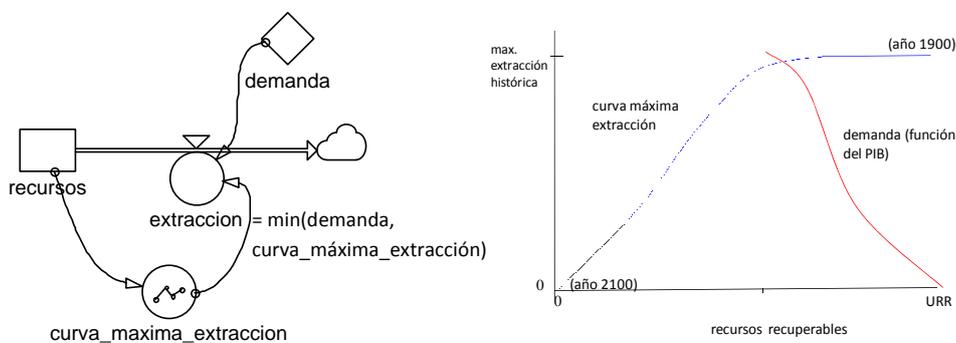


Figura A1: Curvas de extracción máxima en función de los recursos. A la izquierda el modelo dinámico utilizado para modelar la extracción, a la derecha una curva hipotética de máxima extracción (en azul) comparada con la curva de demanda (rojo). En el eje horizontal se representan los recursos y en el vertical la extracción anual.

La figura A2, nos muestra los resultados en términos de energía eléctrica utilizable. Para calcularla hemos tenido en cuenta la conversión de EJ de energía primaria a TWh eléctricos usando las eficiencias actuales, y, en el caso del gas natural y el carbón, descontamos los usos no eléctricos de los mismos

(considerando que la proporción se mantiene similar a la actual en las próximas décadas).

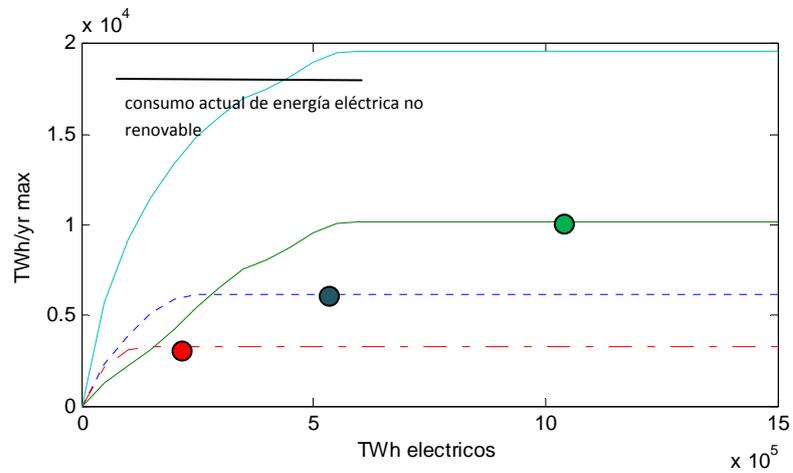


Figura A2: Curva agregada de electricidad de origen no renovable en función de los recursos. En los puntos situados sobre las curvas se indica el lugar en el cual se encuentran los stocks de cada combustible en la actualidad.

Annexo 2: modelo simplificado

