

El futuro de las renovables. La sustitución del petróleo por electricidad.

Margarita Mediavilla Pascual.

Grupo de Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid

Este documento no es más que un borrador para servir al debate que se está llevando a cabo en el foro de Crisis Energética. El documento tiene muchas lagunas, no se ha descrito el trabajo con profundidad, pero he decidido sacarlo a la luz para que vaya animando el debate y para que las posibles críticas se puedan ir incorporando al estudio definitivo.

Este estudio intenta echar un poco más de luz en el debate acerca del futuro de las renovables entre Pedro Pérez Prieto y Roberto Bermejo a base de construir un modelo dinámico (usando dinámica de sistemas). La principal ventaja de este modelo es que relaciona unas cosas con otras y todas ellas respecto al tiempo. El hecho de integrar todos los datos entre sí es tremendamente interesante, porque aporta mucha más calidad a los argumentos. Por ejemplo, uno puede esgrimir el siguiente argumento: "las renovables no tienen futuro porque para construir un megavatio de energía eólica es necesario gastar x kilowatios de energía y x dólares, y en un contexto de escasez energética eso supone agravar todavía más la crisis". El razonamiento es correcto, pero si no lo ponemos en el contexto correcto y no le damos datos no sabemos si ese argumento va a tener más peso que otros argumentos contrarios y que también son correctos como: "el coste de las renovables no es tan elevado comparado con el PIB mundial" o "las energías fósiles nos aportarán suficiente energía para poder invertir en renovables antes de agotarse". Además, a base de trabajar con datos podemos dar más rigor a los argumentos llegando a razonamientos del tipo: "un crecimiento menor de $x\%$ durante x años no supone una carga excesiva, pero uno mayor sí"...etc.

Al hacer un modelo dinámico e integrar todos los aspectos juntos podemos discernir entre estas cuestiones. Sin embargo es también necesario que el modelo sea lo suficientemente sencillo como para que cualquiera pueda entenderlo completo, porque si no se entiende el modelo completo yo, personalmente, pienso que el modelo no sirve. Además mi idea es que el modelo simplemente refleje los argumentos que se han esgrimido en el debate verbalmente y no más cosas. Dejo a los foreros de este portal la tarea de juzgar si esto se ha conseguido con el modelo que se presenta y agradezco enormemente las críticas de todo tipo que puedan hacerlo mejorar.

1. Hipótesis y argumentos básicos del modelo

Las líneas básicas del modelo se describen a continuación, una descripción algo más detallada se puede ver en los anexos.

- **Modelo global.** El modelo es global (mundial) y tomamos como principales variables el PIB, el consumo de petróleo y el consumo de energía eléctrica, tanto renovable como no renovable. Nos fijaremos principalmente en los resultados a corto plazo, ya que mucho más allá de un plazo de 10-15 años la estructura del propio modelo puede cambiar, aunque

también veremos simulaciones a largo o muy largo plazo que nos aportan conclusiones muy interesantes sobre las dinámicas existentes.

- **Petróleo.** Tomamos como dato las curvas de extracción máxima de petróleo de ASPO. En estas curvas se da una estimación de la extracción máxima de petróleo en los próximos años. ASPO, al dar estas curvas no tiene en cuenta que la extracción puede variar debido a la demanda: si no se extrae el petróleo porque hay crisis económica los pozos se vacían más lentamente. En realidad lo que nos dice la geología (y lo que quiere reflejar ASPO) es que la extracción máxima disminuye cuando quedan menos reservas, luego es más exacto hacer depender la extracción máxima de las reservas. Esto es lo que se hace en este modelo, se convierten los datos de ASPO para que se puedan utilizar en función de las reservas y se van calculando las reservas que quedan en función de lo que se va extrayendo.
- **Demanda de petróleo y de electricidad.** El consumo de petróleo y de electricidad depende, como es lógico, del producto interior bruto mundial, de hecho si se observan las gráficas de los datos históricos, se puede ver que el aumento del PIB y el aumento de los consumos de electricidad y de petróleo han seguido una relación bastante lineal en las últimas décadas. Para las predicciones del modelo supondremos que el consumo de petróleo y electricidad sigue estas tendencias. Introducimos una política que hace que, cuando hay escasez de petróleo la sociedad tienda a hacerse más ahorradora y disminuye el consumo de petróleo por PIB mundial, esto es lo que llamamos “ahorro energético” o “aumento de la eficiencia energética”, pero, como es lógico, este cambio lleva tiempo.
- **Agotamiento de combustibles para energía eléctrica.** No sólo el petróleo está sujeto a declive, también el gas natural y el carbón (y el uranio) lo están. Sin embargo a la hora de encarar las curvas de agotamiento de estos recursos nos encontramos que, por un lado existe mucha más indeterminación y controversia en las curvas de extracción máxima (sobre todo del carbón), y por otro lado todos los expertos coinciden en que su declive se producirá unas décadas más tarde que el del petróleo (y por ello la importancia de estos recursos sobre nuestro modelo a corto plazo es mucho menor). Por ello hemos optado por una representación aproximada y de forma conjunta de estos recursos. Usaremos una curva como la del petróleo (extracción máxima en función de reservas) que recoge las ideas generalmente asumidas acerca del carbón (como principal combustible para generar electricidad): “existen reservas para 100 años al consumo actual” y “el máximo de extracción de carbón es un 20-30% superior al consumo actual”.
- **Energías renovables.** Las energías renovables parten de una capacidad de generación baja en 1985 pero aumentan a un ritmo fuerte (mayor del 20% anual) hasta representar casi un 2% del consumo eléctrico en 2007. La infraestructura renovable se descarta a un 5% anual debido a su deterioro (vida útil 20 años). A partir de 2009 las infraestructuras renovables se van incrementando a un ritmo decidido por el que ejecuta el modelo (es nuestra política a decidir).
- **PIB-energía.** La relación entre el PIB y la energía es evidente, si existe escasez energética el crecimiento económico se debe ver resentido de alguna manera. Sin embargo esta es la parte más oscura y difícil de prever de nuestros modelos (y es, además, muy sensible). No podemos obviarla, porque no podemos presumir que siga existiendo crecimiento cuando

hay escasez, pero tampoco podemos hacer mucho caso de nuestro modelado. De momento voy a prever que la economía decrece cuando hay escasez de energía, pero los resultados cuantitativos habrá que mirarlos con escepticismo.

2. Resultados y conclusiones.

Unos experimentos como tanteo para ir viendo cómo se comporta el modelo y extraer las primeras conclusiones. Habrá que realizar un análisis de sensibilidad más serio para poder afirmarlas, pero de momento esto es lo que hay.

Los detalles del modelo se pueden ver en el anexo, pero de momento, para poder entender las simulaciones diré que se va simulando que el PIB (GDP) va creciendo a un ritmo constante (el que cuadra los datos históricos desde 1985) siempre y cuando no exista escasez de petróleo. Cuando la extracción de petróleo que requiere este PIB es mayor que lo que las curvas de ASPO nos dicen se declara escasez (la variable `abundance_oil` se hace negativa). Ante esta escasez el crecimiento económico disminuye y se hace proporcional a la derivada de la extracción de petróleo (siguiendo los modelos de de Castro y las ideas de Hirsch). También el crecimiento se resiente cuando hay escasez de energía eléctrica.

Políticas. Hay tres políticas básicas en el modelo que nosotros elegimos y que damos como un factor de aumento creciente proporcional (y constante durante toda la simulación): el crecimiento de las energías renovables que proporcionan electricidad, el cambio de infraestructura basada en el consumo de petróleo a otra basada en consumo de energía eléctrica (“coche eléctrico”) y el ahorro energético (menor demanda de petróleo para el mismo nivel de PIB). Además se cambian algunos parámetros del modelo como el coste económico de aumentar la infraestructura para producir energía eléctrica renovable y la TRE.

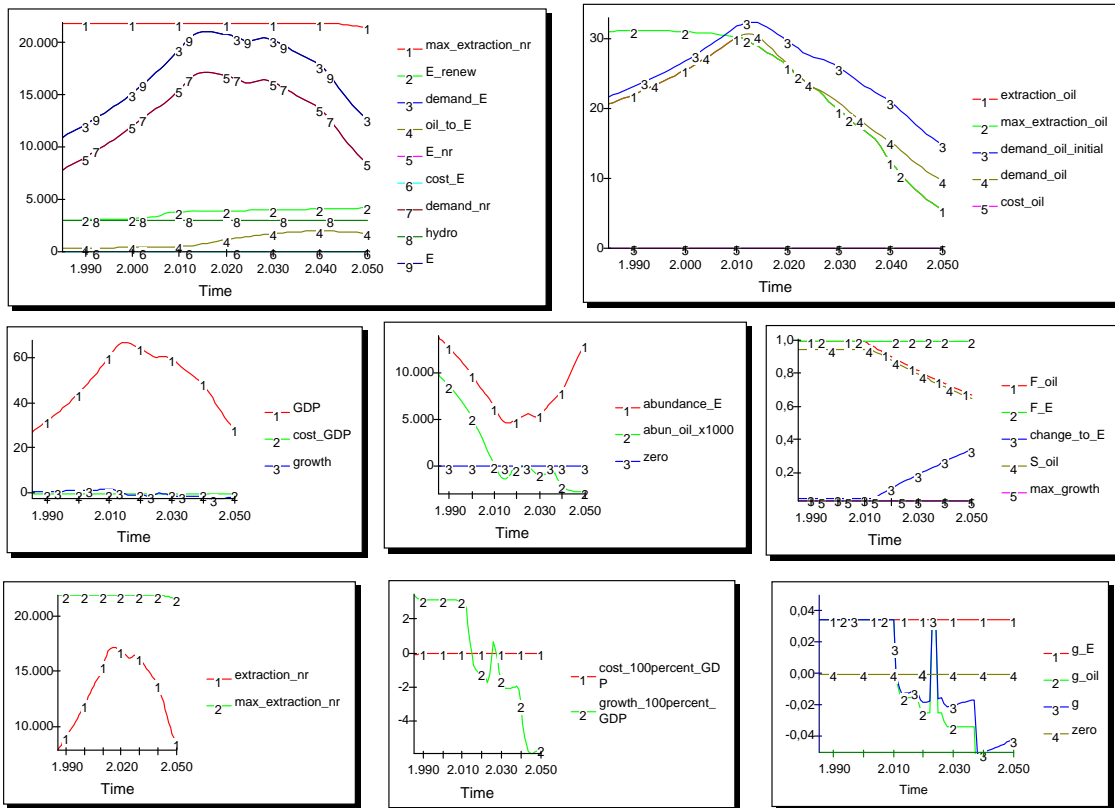
Esto son políticas dadas por nosotros y son constantes: invertimos en renovables tanto por ciento anual, por ejemplo, independientemente de que tengamos ya exceso de energía eléctrica o crecimiento económico. No es que sea muy sensato, es simplemente la política que estamos experimentando en el modelo, la más sencilla, se pueden definir de forma más sofisticada si queremos en siguientes estudios.

Los nombres de las variables son bastante explicativos por si mismos, excepto las variables `g_e` y `g_oil`. Éstas son los crecimientos porcentuales (en 1%) de la economía dependiendo de la escasez de petróleo y electricidad, mientras que `g` es el resultado final, es el crecimiento económico porcentual (1%), que depende de una función combinada de `g_E` (el crecimiento-decrecimiento ligado a la escasez de electricidad) y `g_oil` (el ligado a la escasez de petróleo) y de la sustitución tecnológica del petróleo por electricidad que tengamos en cada momento (si el petróleo se ha sustituido completamente $g=g_E$).

`Cost 100% GDP` y `growth 100% GDP` son los porcentajes que supone el crecimiento económico y el coste económico de las renovables comparados con el PIB mundial, pero estos son porcentajes en 100%. `Demand_oil_initial` es la demanda de petróleo que habría de no realizarse el cambio a energía eléctrica. `Cost_E` es el coste energético de la implantación de energías renovables en términos de petróleo necesitado y `Cost_GDP` el coste económico de esta transformación.

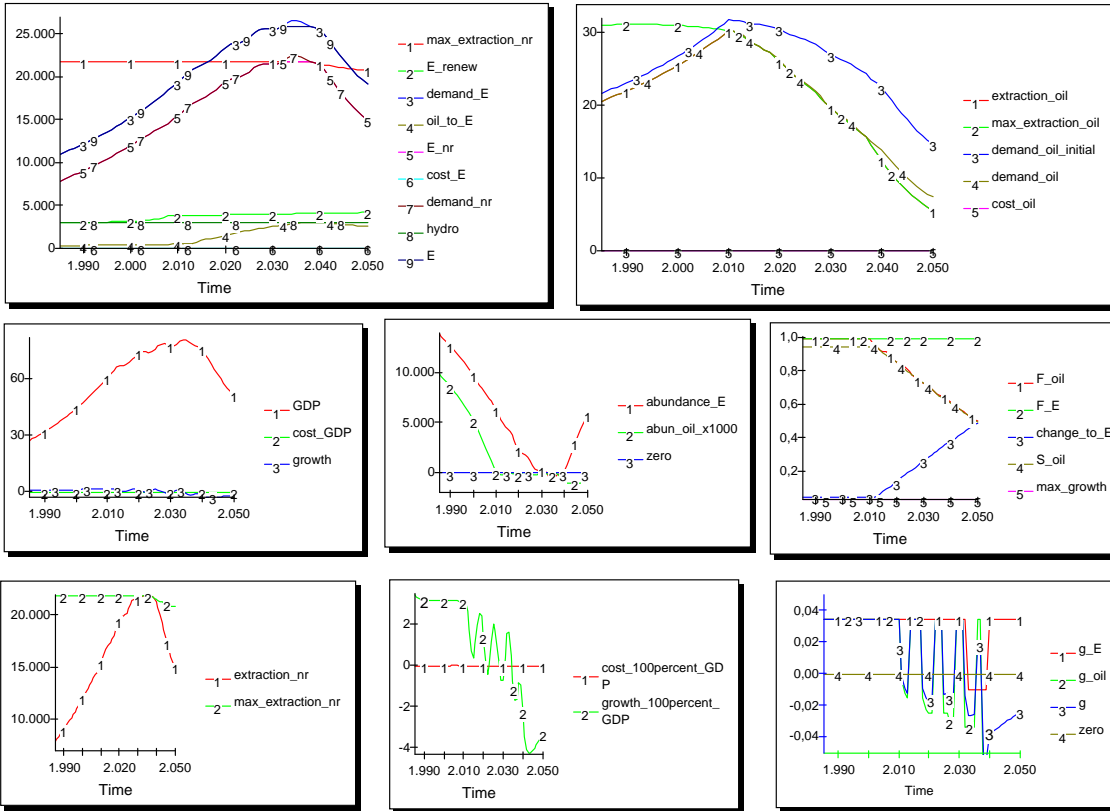
Veamos algunos resultados preliminares.

Cambio a electricidad bajo (1% anual) y ahorro bajo (1% anual), aumento de las renovables bajo (5% anual), TRE=20.



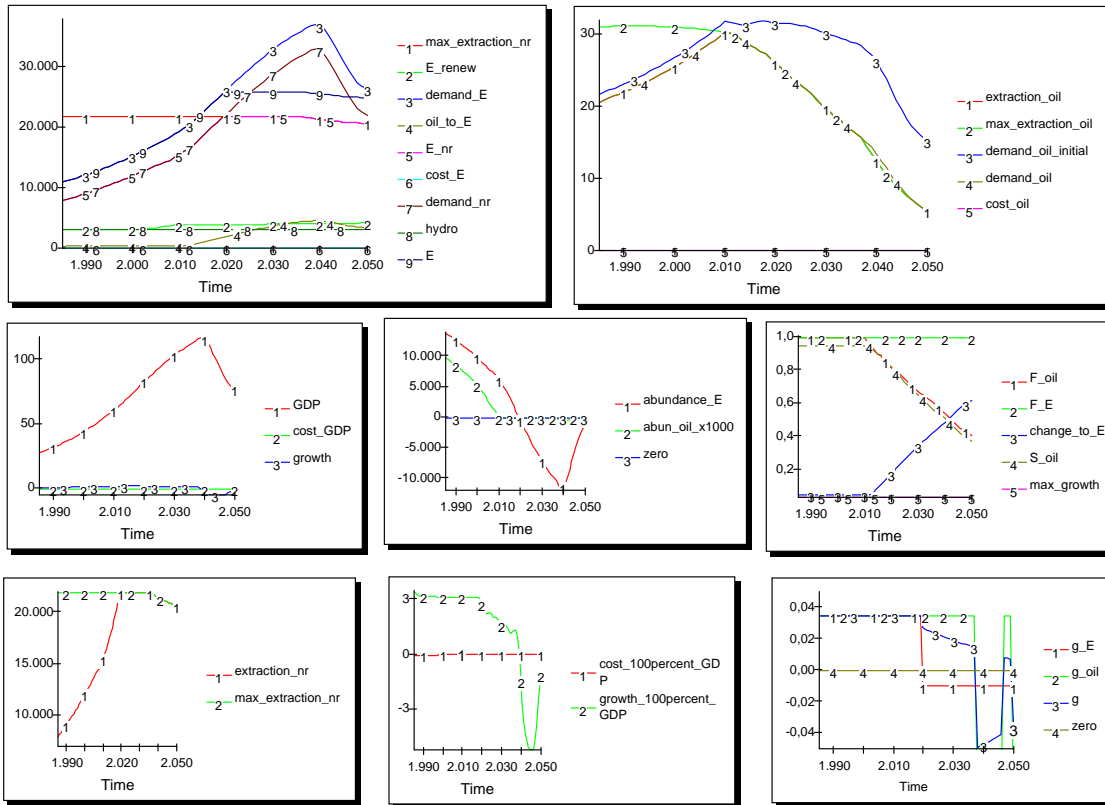
A este ritmo para 2050 hemos conseguido un 40% de sustitución del petróleo y un 20% de ahorro, pero no es suficiente. Las renovables han aumentado muy poco pero da igual, nos sobra energía eléctrica, se consume mucho menos que en 2010 por la caída del PIB y no se llega a los límites de extracción. La demanda de petróleo cae mucho, debido a la sustitución y a la crisis económica, pero siempre se queda por encima del límite físico y la economía no crece.

Cambios un poco más rápidos. Cambio a electricidad del 2% y ahorro del 2% anual, renovables 5%.



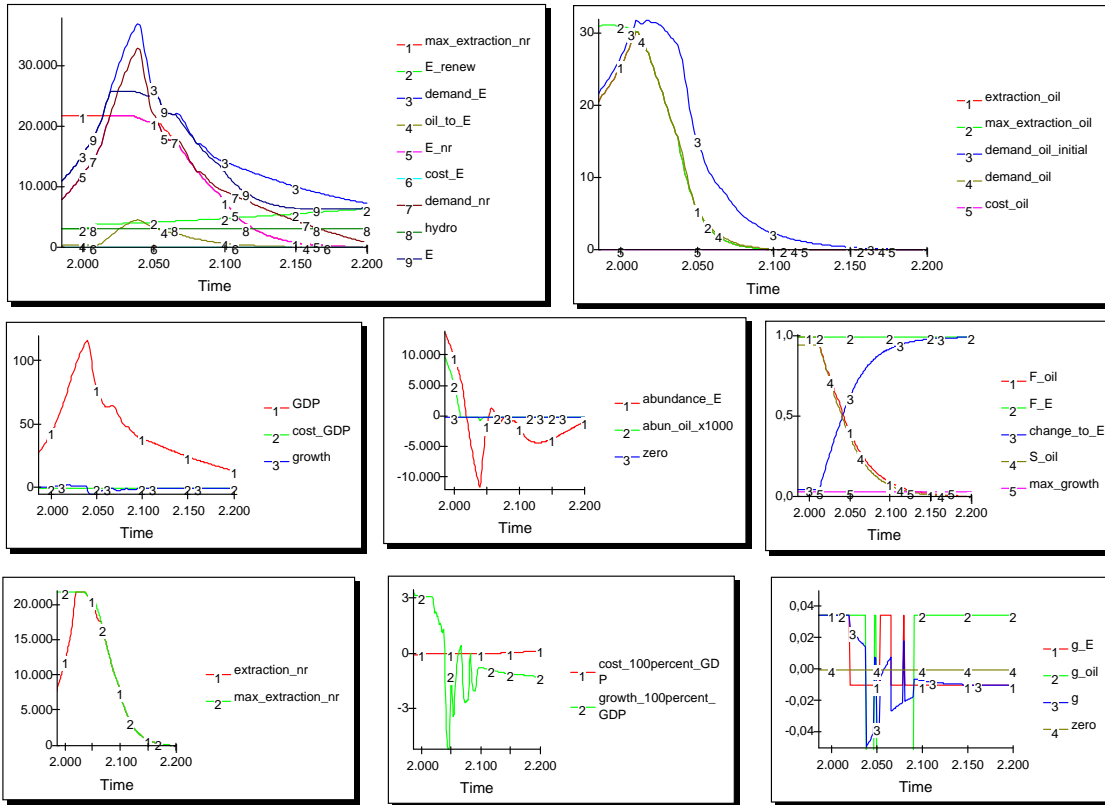
Nos seguimos cayendo, un poco menos, pero no es suficiente.

Cambios moderados. Cambio a electricidad del 3% y ahorro del 3% anual, renovables 5%.



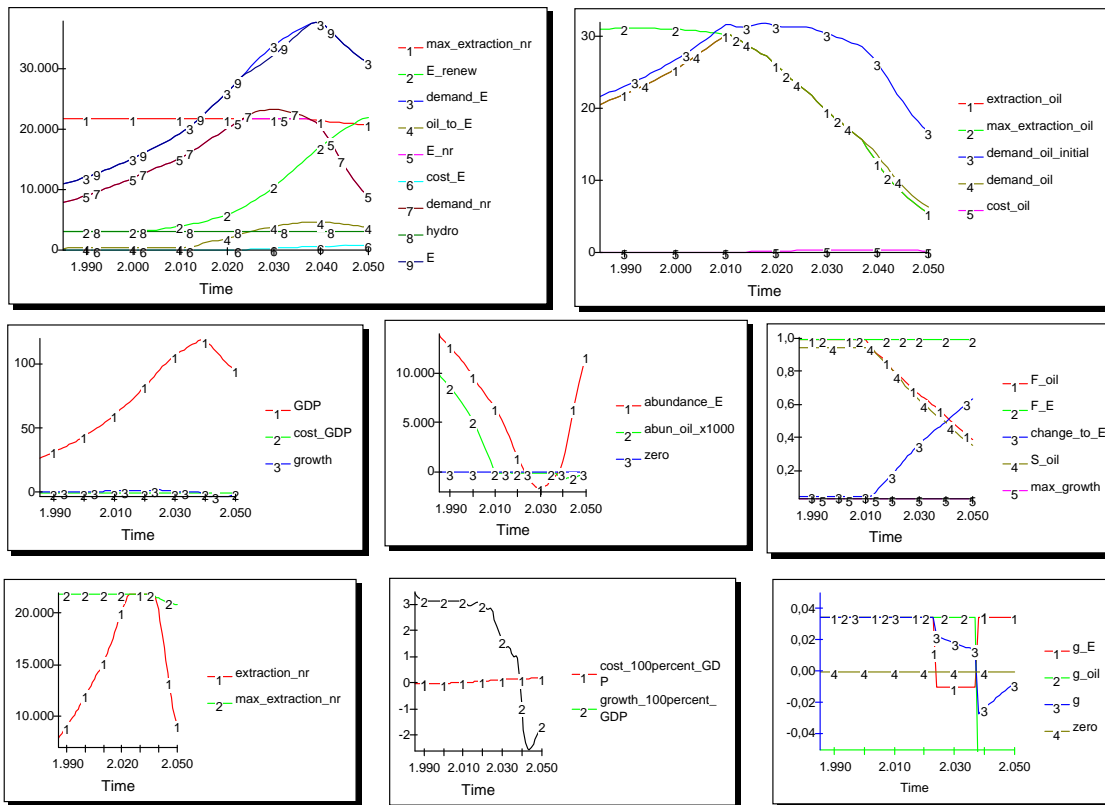
Con esto conseguimos compensar los declives y seguimos creciendo económicamente. Luego caemos, pero es por la electricidad, las renovables van muy lentas y no consiguen crecer apenas y hacia 2040 llegamos al límite de los combustibles fósiles. Vamos a ver qué pasa con esto a largo plazo.

**Cambios moderados. Cambio a electricidad del 3% y ahorro del 3% anual, renovables 5%.
Largo plazo.**



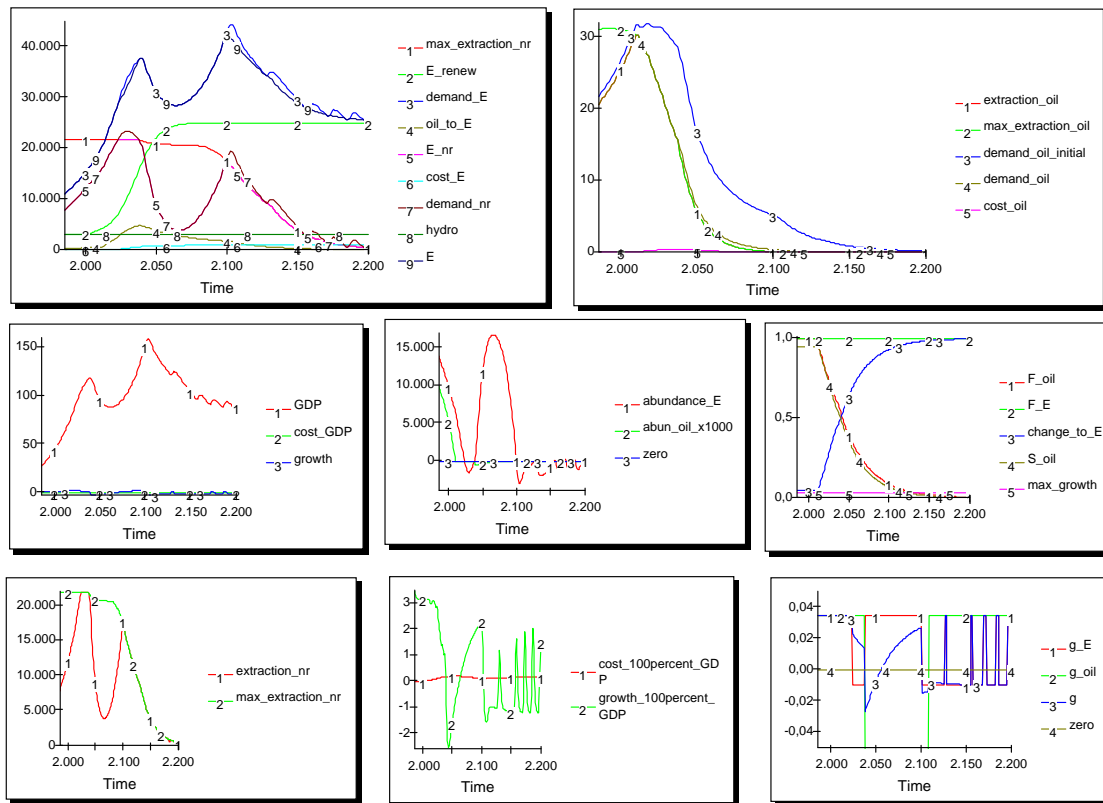
Declive. Las renovables van demasiado lentas. Vamos a aumentar su ritmo.

**Cambios moderados. Cambio a electricidad del 3% y ahorro del 3% anual, renovables 15%.
Corto plazo.**



A corto plazo esto parece bastante bueno, sigo creciendo económicamente hasta 2040, pero en ese momento las fósiles se estancan y las renovables todavía no han llegado a su límite, además, como he seguido creciendo, voy a terminar cayendo porque las renovables no van a ser suficientes.

**Cambios moderados. Cambio a electricidad del 3% y ahorro del 3% anual, renovables 15%.
Largo plazo.**

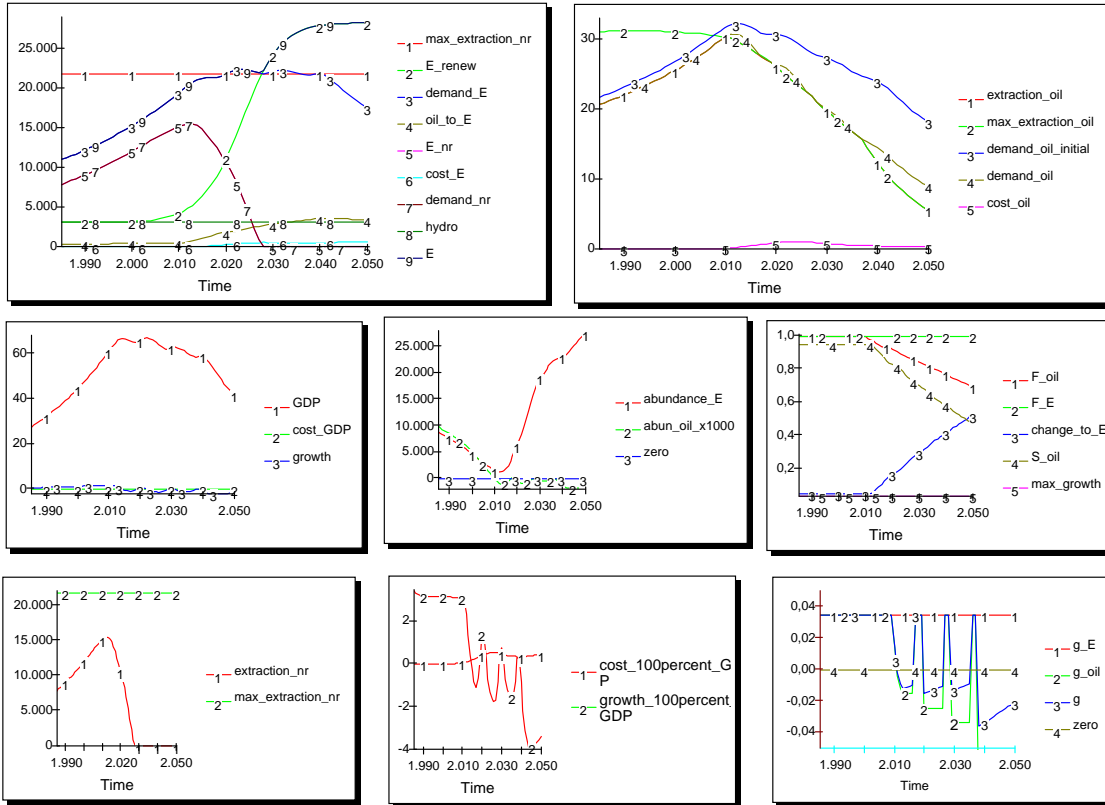


La verdad es que este es uno de los mejores escenarios que se puede conseguir. Dado que he fijado (de forma casi completamente arbitraria) el límite físico de la energía renovable en el consumo actual, al final el PIB debe bajar para acomodarse a este límite. Y como hacemos una buena sustitución del petróleo por electricidad y conseguimos seguir creciendo económicamente, cuando se acaban las fósiles resulta que hemos crecido mucho y no tenemos renovables suficientes (aunque éstas han crecido bastante rápidamente). Luego seguimos con las renovables y volvemos a tener una época de bonanza, pero al final se terminan las fósiles del todo y volvemos a caer hasta el límite sostenible, y al final oscilamos alrededor de este límite.

El caso es que la dinámica del crecimiento económico y las renovables a largo plazo siempre tiende a darnos perfiles de este estilo, con forma de silla de caballo. No creo que esto sea un error del modelo, y, aunque sean resultados a largo plazo nos está diciendo algo interesante: debemos estimar de forma realista cuáles son nuestras posibilidades de obtener energía renovable e intentar acomodar nuestro crecimiento a ese límite, porque si nos dedicamos a crecer siempre que tenemos exceso de energía vamos a tener una montaña rusa de crisis abruptas. Podemos tener épocas de abundancia, pero si nos dedicamos a crecer por encima de ese límite nos exponemos a colapsos más grandes que si vamos lentos en el desarrollo de la energía renovable.

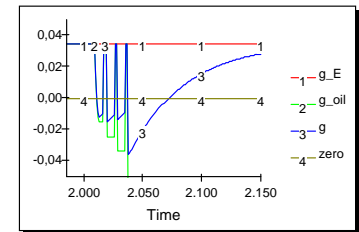
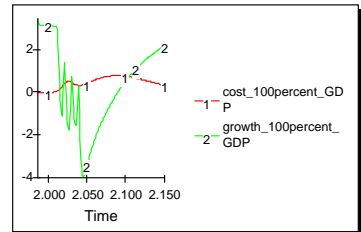
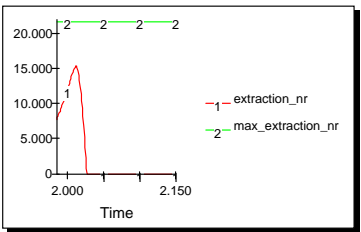
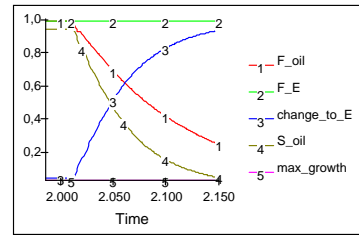
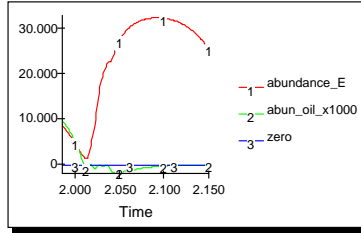
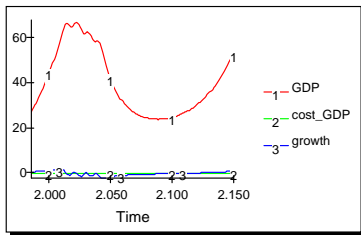
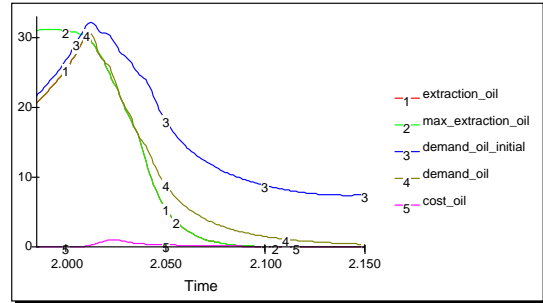
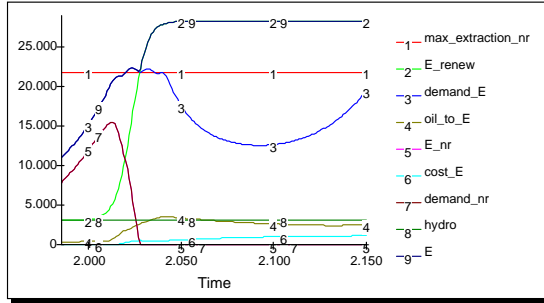
En fin, esperemos que la humanidad después de periodos de 10 o 20 años de recesión económica haya cambiado sus tendencia respecto al derroche de energía y el crecimiento.

Escenario estable. Cambio a electricidad del 2% y ahorro de petróleo del 1% anual, renovables 25%. Corto plazo.



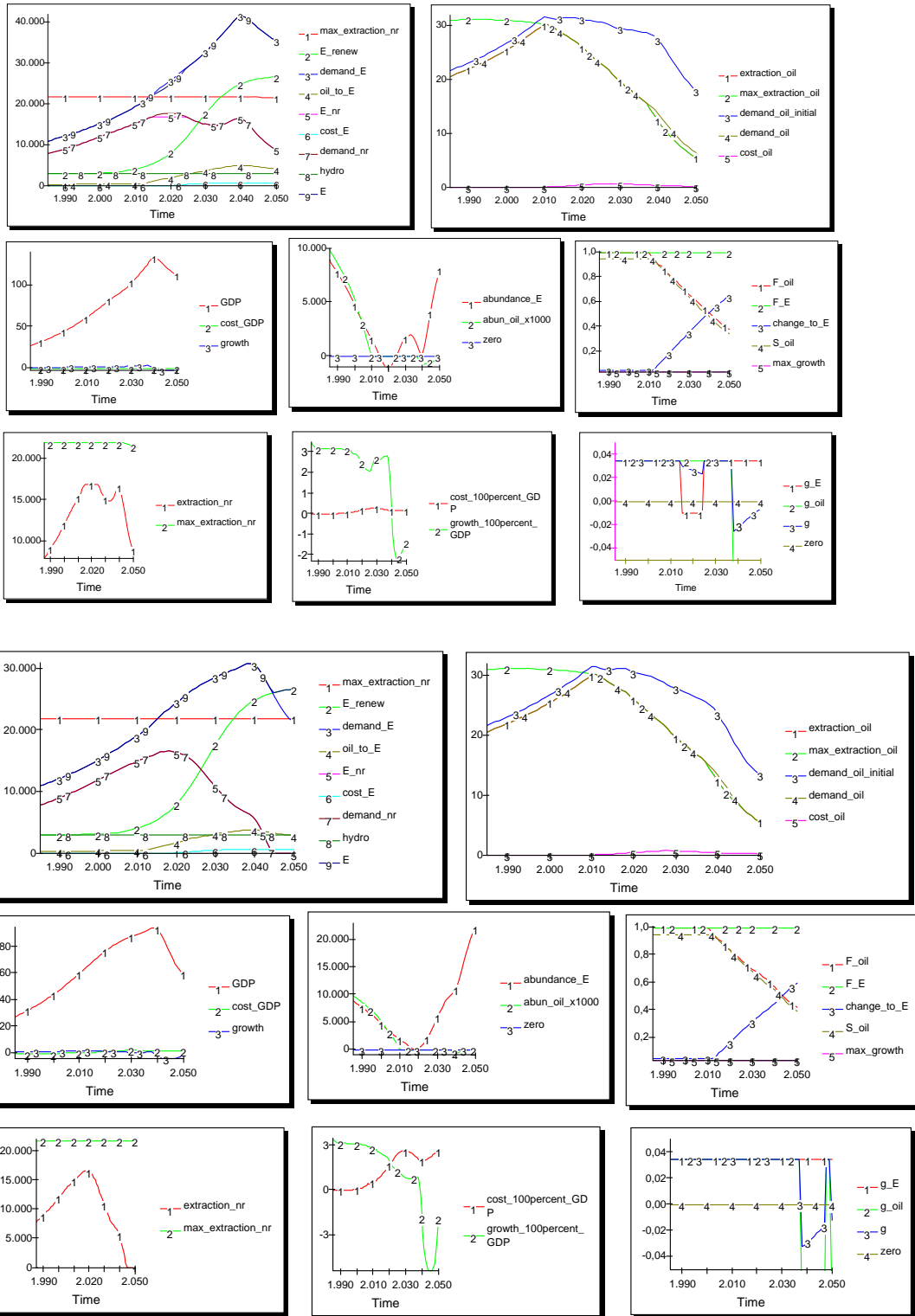
Este es un escenario bastante estable tanto a corto como a largo plazo. No llegamos a compensar todo el declive del petróleo, para 2030 tenemos problemas, pero en ese momento las renovables están muy fuertes, y han crecido muy rápido, además el coste económico de implantar estas renovables tampoco es tan elevado. Hacia 2040 se empieza a decrecer por falta de petróleo (no de electricidad que sobra por todas partes), pero a largo plazo se ve que no cae demasiado, aunque la forma de silla de caballo no nos la quita nadie. Tenemos que hacer un buen análisis de sensibilidades para determinar si existen soluciones más estables, pero el comportamiento básico es este.

Escenario estable. Cambio a electricidad del 2% y ahorro de petróleo del 1% anual, renovables 25%. Largo plazo.



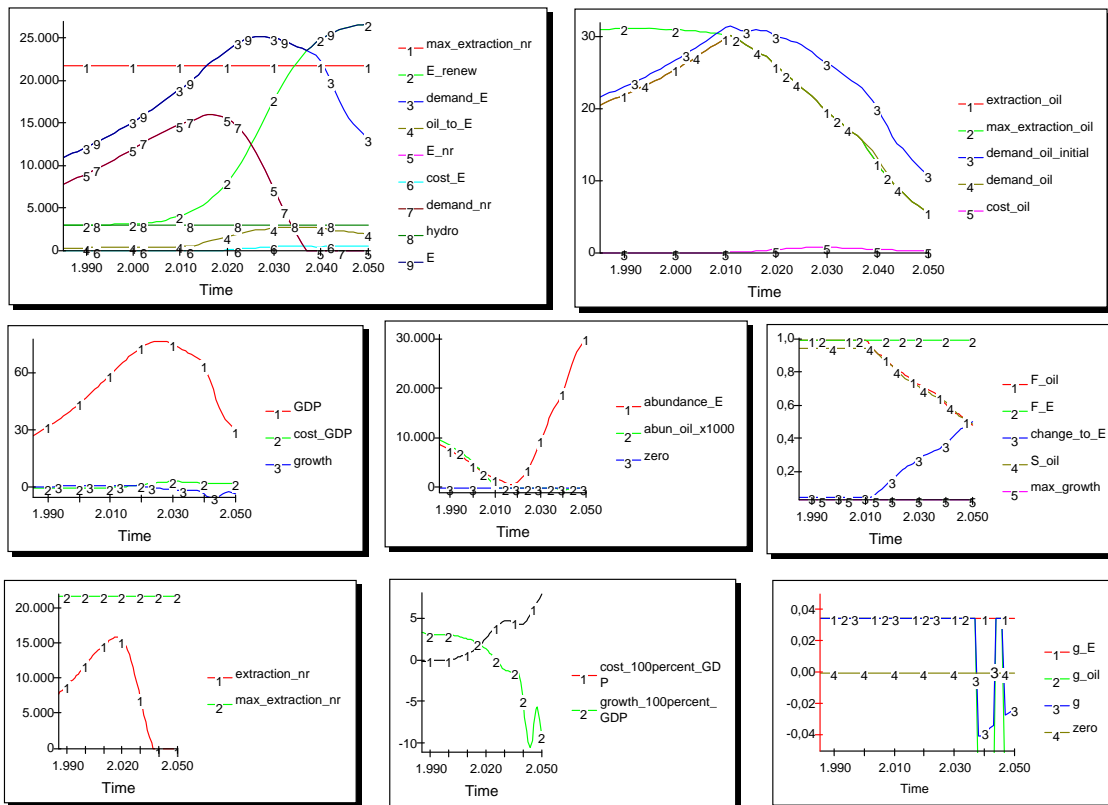
Renovables mucho más caras económicamente en escenario de crecimiento.

Cambio a electricidad del 3% y ahorro de petróleo del 3% anual, renovables 20% (más o menos el crecimiento actual). (8 veces más caras de lo estimado las renovables $2 \times 10^{-4} \times 8$ T\$/TWh anual) . Primero con el precio normal y luego 8 veces, en este escenario de sustitución rápida ni nos enteramos.



Renovables 12 veces más caras.

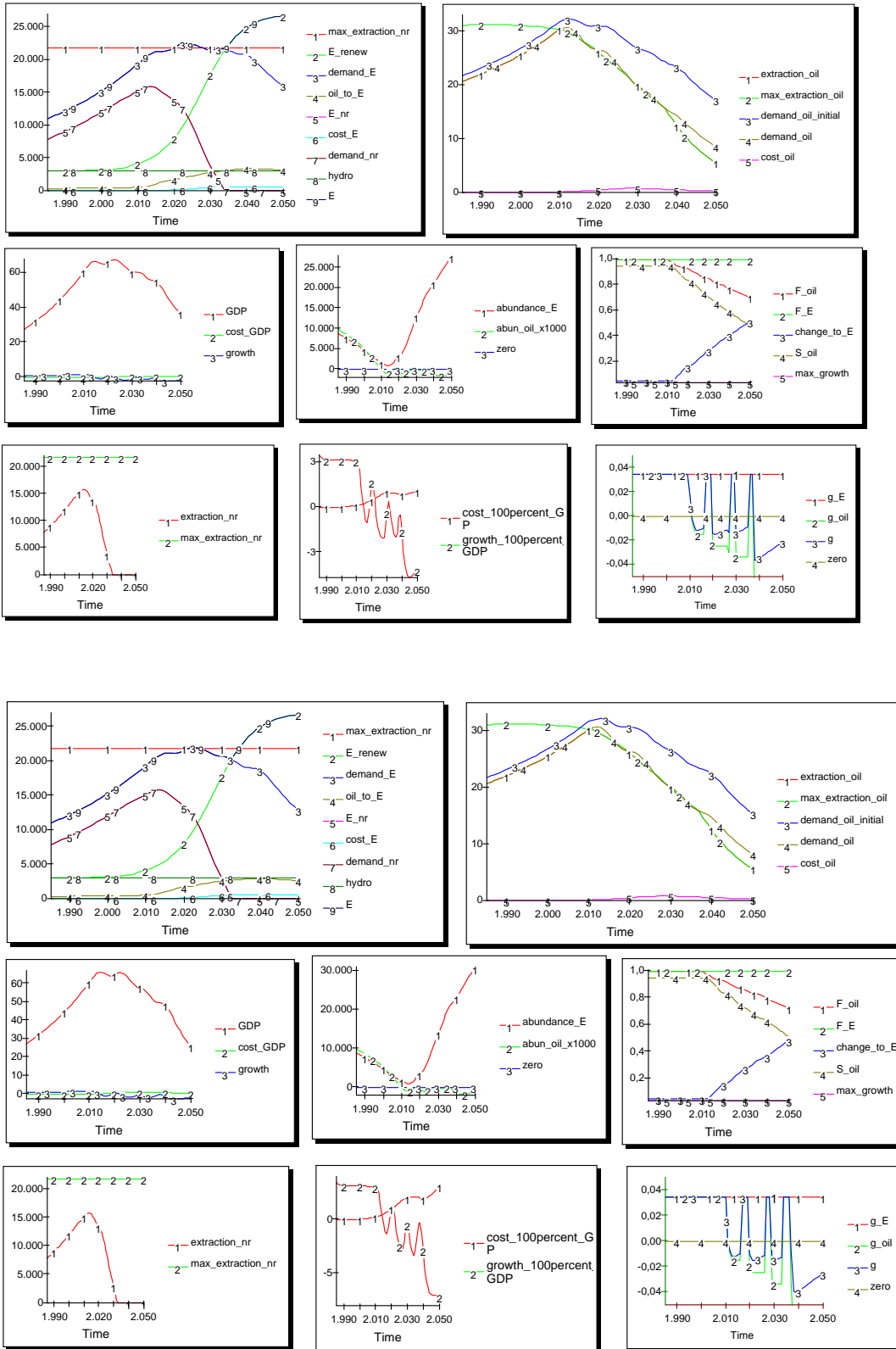
Cambio a electricidad del 3% y ahorro de petróleo del 3% anual, renovables 20% (más o menos el crecimiento actual). (12 veces más caras de lo estimado las renovables $2 \cdot 10^{-4} \cdot 12$ T\$/TWh anual).



Ahora sí que se comen el crecimiento las renovables, aunque esto a largo plazo...hasta quizá sea positivo, porque así no crecemos tanto por encima del límite que nos permiten las renovables y no caemos luego tanto.

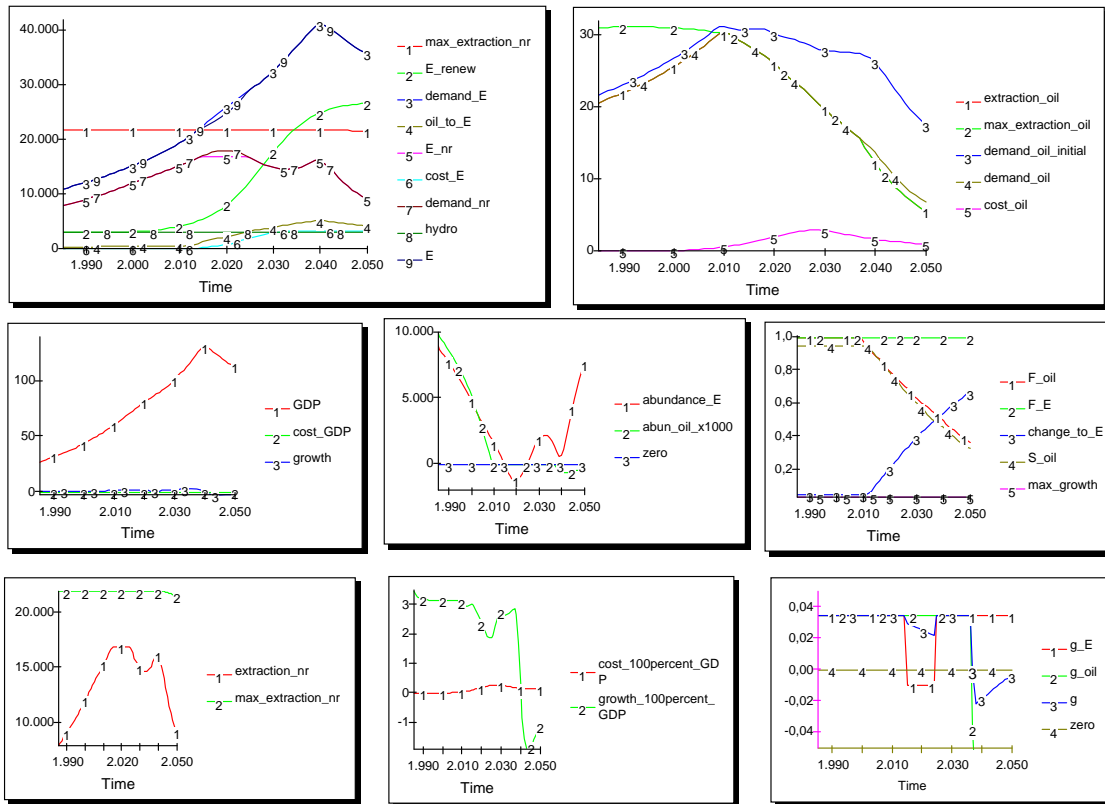
Renovables más caras en un escenario estable.

Cambio a electricidad del 2% y ahorro de petróleo del 1% anual, renovables 20% (más o menos el crecimiento actual). (2 y 4 veces más caras de lo estimado las renovables 2*1e-4*4T\$/TWh anual) . 4 veces ya es demasiado.



TRE bajo (5)

Cambio a electricidad del 3% y ahorro de petróleo del 3% anual, renovables 20% y TRE =5.



Con esta TRE se ve que el coste energético en electricidad de las renovables es similar a la hidráulica, como un 15% del consumo, ...no es demasiado. Hay que tener en cuenta que esto no se está realimentando en el modelo, este coste calculo pero no lo sumo al consumo global, debería sumarlo, pero el modelo se me hacía muy inestable si lo metía y mientras no sean muy elevados no los voy a meter. No es excesivo de todas formas.

Conclusiones

- ✓ ¿Qué papel juegan las renovables en la crisis energética global?

Pues la verdad es que las conclusiones de este modelo vienen a tirar por tierra algunos de los argumentos del debate, ¡y en gran medida también mis propias ideas! Pues...el papel que juegan es poco, por lo menos a corto plazo. La dinámica del modelo está muy determinada por un hecho claro: el cénit del petróleo se estima para ya mientras que el cénit del carbón y otros combustibles para generar electricidad se estima para 2020-2030 y además se puede todavía incrementar el consumo de estos combustibles. Por ello el papel de las renovables, que ahora mismo sólo dan electricidad, empieza a ser relevante a partir de esa fecha, pero a muy corto plazo es la influencia que el petróleo tiene en la economía y el hecho de que sepamos sustituirlo por otra energía o que sepamos mantener el mismo nivel de actividad económica con menos petróleo, lo que determina nuestro comportamiento. Porque, si no sabemos solucionar la escasez de petróleo, terminamos no teniendo problemas de energía eléctrica, simplemente nuestra actividad económica cae tanto que ya no necesitamos ni renovables ni energía eléctrica ni nada.

Esta sustitución del petróleo, según los datos de ASPO, debe ser rápida, del orden del 3% anual con ahorros del mismo orden, de forma que se pueda compensar el declive estimado por ASPO, y además se hace muy crítica alrededor de 2050.

Las renovables, sin embargo, son importantes a largo plazo a la hora de no caer demasiado una vez que el petróleo y los combustibles no renovables se han agotado, pero se da un hecho curioso. Si se toma un ritmo de crecimiento moderado para las renovables, éstas empiezan a despuntar cuando todavía no se ha agotado los combustibles fósiles, y si el ritmo de sustitución del petróleo ha sido también elevado, se consigue llegar a una época abundante en energía eléctrica, tanto fósil como renovable, lo cual potencia una época de fuerte crecimiento económico. Esto hace crecer el PIB y la demanda de energía eléctrica por encima del límite físico de las renovables. Con lo cual, cuando los combustibles fósiles se agotan, el PIB cae desde más alto hasta que se agotan las fósiles, con lo cual termina habiendo una gran caída de todas formas.

Por todo esto y por esa manía que tiene el sistema a crecer en cuanto tiene exceso de energía (lo cual, desgraciadamente no es sólo cosa del modelo, es bastante realista aunque en el modelo se hace de forma algo abrupta que habrá que corregir en futuras versiones) tenemos muy pocos comportamientos sigmoidales hacia el equilibrio, solemos tener siempre sobrepicos y caídas.

- ✓ ¿Es el coste económico y energético de las renovables uno de los problemas de su implantación?

Según los datos que he utilizado, y que ruego a los lectores que revisen por si acaso no son los adecuados, no da la impresión de que el coste energético ni económico de la

transición petróleo-electricidad sea determinante. Estos costes existen y son importantes, pero no son relevantes cuando se comparan con el PIB mundial total ni con la energía total consumida. Sólo muestran su relevancia cuando se encuentran valores extremos en los parámetros que yo creo que están fuera de los rangos realistas.

✓ ¿Son la solución las renovables?

Al final, mal que nos pese, estamos en las mismas de siempre. No encontramos una transición suave hacia un estado sostenible alimentado por las renovables, o es difícil encontrarla, porque la transición de independencia del petróleo debe ser muy rápida y sobre todo por esa tendencia a crecer que tenemos que va a hacer que lleguemos a picos y caídas, y eso independientemente de que ahorremos, pasemos a electricidad o promovamos las renovables. Estamos con las conclusiones del Club de Roma: el problema es el crecimiento. Sólo si conseguimos domar este crecimiento podemos llegar de forma suave a un estado sostenible.

✓ Indeterminaciones

De todas formas hay parámetros que influyen mucho en el modelo y que no sabemos determinar. El límite físico de las renovables es uno de los más importantes y, sinceramente, yo no me atrevo a dar ninguna estimación. He supuesto que el 100% de la electricidad consumida actualmente en el mundo se puede conseguir a largo plazo, pero a largo plazo hay tantas incógnitas tecnológicas que me temo que cualquier estimación es en vano.

Además el modelo propone unas políticas iniciales y las mantiene a lo largo de toda la simulación (x% de crecimiento de las renovable o x% de ahorro o sustitución) esto nos vale a corto plazo y como tanteo, pero es lógico que, ante las situaciones de escasez y de crisis, este tipo de políticas cambien y mucho. Por ello los resultados de nuestro modelo no son válidos más que a corto plazo y a largo plazo como orientación. Es lógico pensar que, si se ve que el ahorro en petróleo no es suficiente, el cambio se acelere, y también es esperable que, si se ha pasado por una crisis energética grave, al finalizar esta la mentalidad general haya cambiado y la humanidad se lo piense dos veces antes de volver otra vez a la senda del gasto creciente de energía.

✓ Conclusiones generales

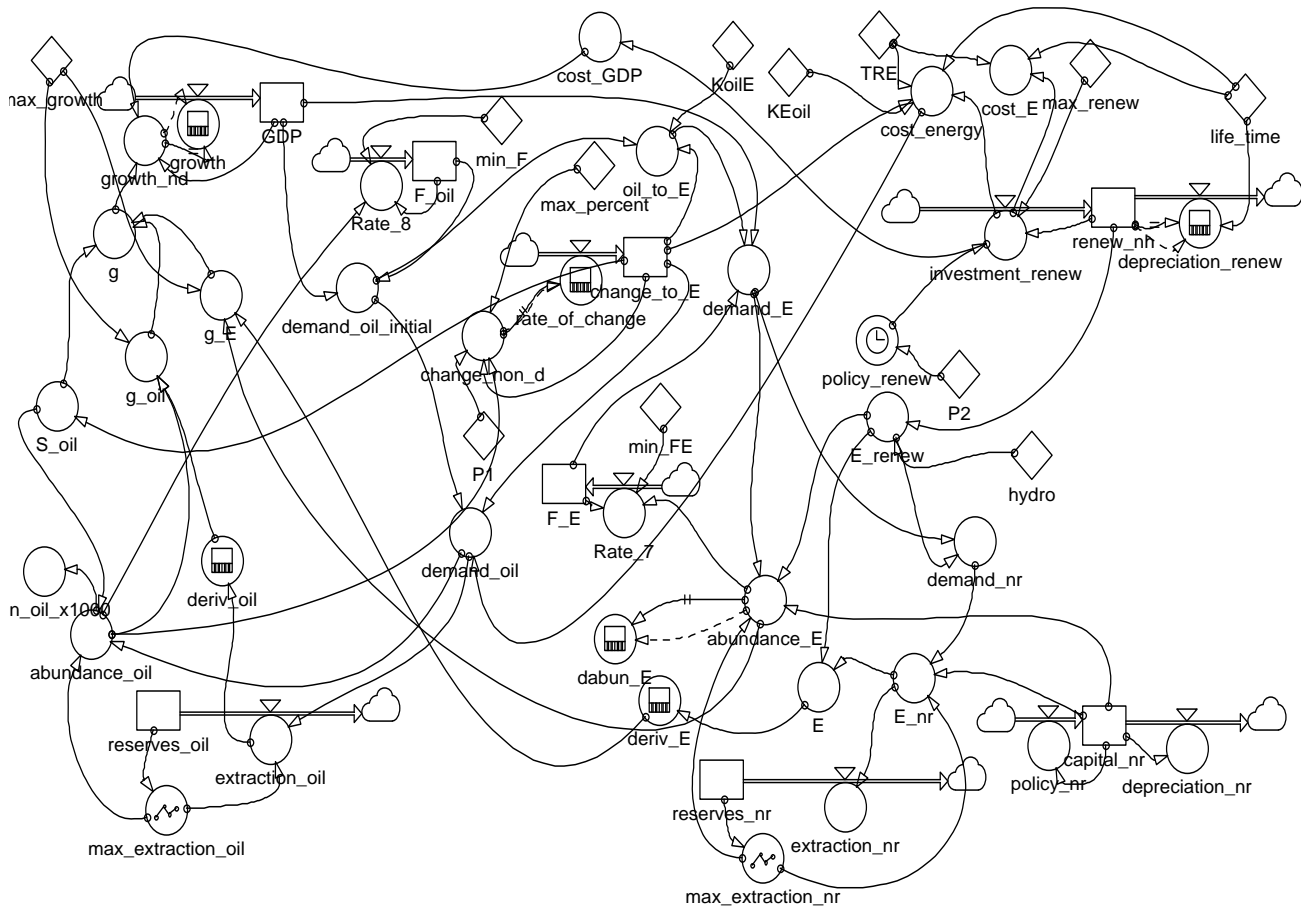
De todas formas las conclusiones que yo extraería serían las siguientes:

- Espabilarse y mucho para sustituir el petróleo por energía eléctrica y por ahorro y por independizar la economía del petróleo como sea, bien con coche eléctrico, con transporte público, ahorro, eficiencia, trenes, bicis...

- Seguir desarrollando las energías renovables al ritmo actual, que es bastante elevado, eso que tenemos para el futuro y ese CO2 que nos ahorramos, y no preocuparse mucho de los costes energéticos o económicos, que no son tantos.
- Pensar muy seriamente en un sistema económico que no nos lance a incrementar el consumo energético cada vez que la economía crece y cada vez que no tenemos déficit de energía, si no, los colapsos están asegurados más tarde o más temprano. Estimar cual es el límite de energías renovables que podemos permitirnos y acomodar el crecimiento económico a ese límite.

3. Apéndices: modelo, parámetros, ecuaciones....

Esta parte está muy incompleta, pero de momento doy algunas pinceladas. El diagrama de Forrester del modelo se puede ver en la figura



Como niveles tenemos el GDP (en T\$: tera-dólares), la capacidad de producción de energía eléctrica renovable y no renovable en TWh/yr, las reservas de petróleo (en Gb) y de combustibles para electricidad no renovable (en TWh), change_to_E y F_oil son los niveles del cambio porcentual a energía eléctrica y la eficiencia energética de la sociedad, que van cambiando poco a poco si se detecta escasez.

EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO

(nivel) `reserves_oil` init `reserves_oil = 2000-537.62` Gb

Reservas de petróleo convencional y no convencional según datos de ASPO sacados de los datos de PPP. En 1985 hay una extracción acumulada de unos 537 Gb, se supone que las reservas totales extraíbles son de entre 1900Gb y 2600 según ASPO o CERA u otros. Según Kjarstad. Tomo como URR=2000 Gb.

`extraction_oil` = MIN(`demand_oil`, `max_extraction_oil`) Gb/year

Como es lógico se extrae o bien el petróleo que se demanda o bien el máximo de extracción cuando la oferta es incapaz de seguir a la demanda.

`max_extraction_oil`

Gráfico de extracción máxima de petróleo sacado de las curvas ASPO. En la figura 3 se pueden ver las estimaciones de producción máxima de ASPO de petróleo convencional y no convencional y gas. Estos mismos datos se observan en la figura 4, tomando únicamente los de la suma del petróleo convencional y no convencional.

Sin embargo estas predicciones ASPO no se pueden tomar en cuenta cuando se usa un modelo dinámico energía-economía como el nuestro, ya que la extracción va a depender no sólo de los límites físicos, sino, como es lógico, de la demanda. Para poder tener la demanda en cuenta podemos poner las curvas no en función del tiempo, sino de las reservas (estimadas), porque al fin y al cabo los límites de producción de los que habla ASPO no dependen del tiempo, sino del agotamiento físico (es decir, de las reservas).

Estos datos dan lugar a las figuras que luego se usarán en el modelo, gráficos de máxima extracción de petróleo en función de las reservas restantes. El gráfico usado en Powersim se puede ver en la figura 5.

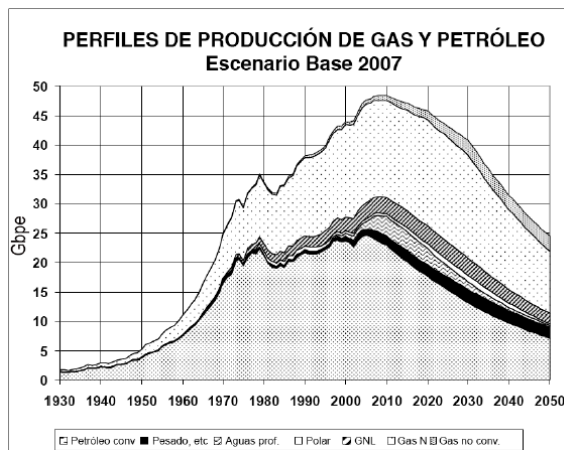


Figura 3: Curvas de extracción histórica y estimaciones de extracción máxima de petróleo según ASPO.

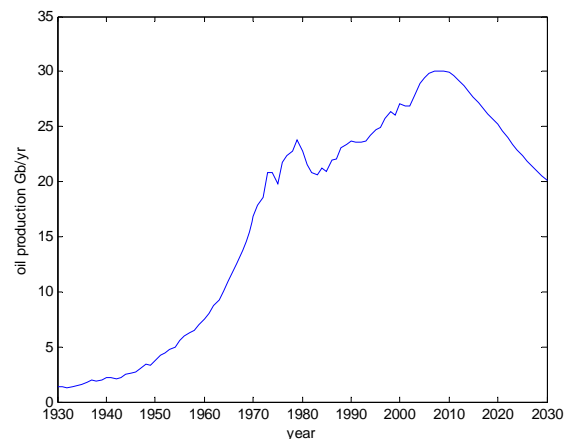


Figura 4: extracción de petróleo convencional y no convencional, según previsiones ASPO.

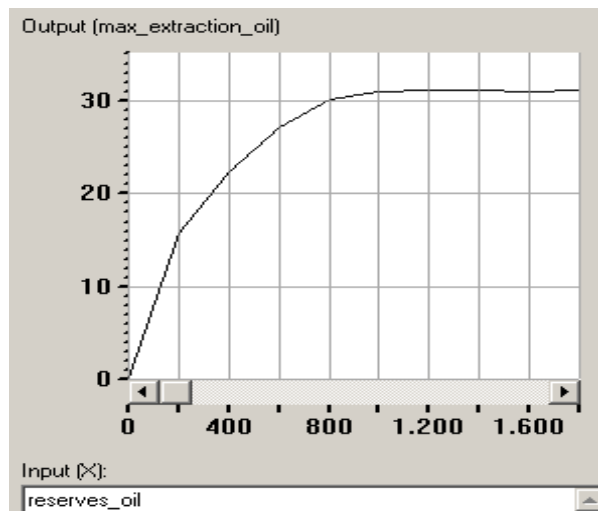


Figura 5: Gráfico de extracción máxima en función de las reservas usado para las simulaciones.

$$\text{demand_oil} = F_oil * ((22.8 + 3e-13 * (\text{GDP} - 3.1e13))) \quad \text{Gb/yr, GDP en \$ PPP 2000}$$

La demanda de petróleo la hacemos proporcional al PIB, usando como aproximación una recta, (sacada de los datos de Carlos y PPP). Los datos históricos se pueden ver en la figura 6 y se puede ver que, después de la crisis petrolera de los años 70, el ajuste a una recta es bastante aceptable. Usamos además en factor F_oil a modo de “eficiencia”, es un factor que inicialmente vale la unidad y que se va haciendo menor a medida que la sociedad gasta menos petróleo por unidad de PIB.

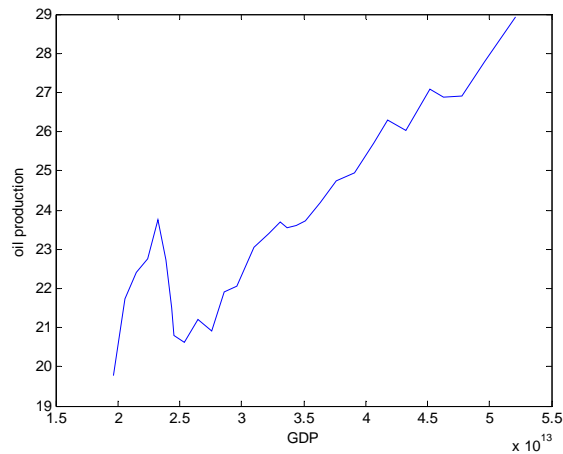


Figura 6: datos históricos de PIB y consumo de petróleo

$$\text{growth_oil} = \text{DERIVN}(\text{extraction_oil})/\text{extraction_oil}$$

Derivada de la extracción de petróleo, dividida entre el valor de la extracción para que sea porcentual. Este valor se utilizará para estimar el decrecimiento económico causado por la escasez de petróleo.

En este modelo tenemos que hacer depender la economía no sólo de la escasez de petróleo sino también de la escasez de energía eléctrica. Esto a corto plazo no tiene mucha importancia, porque la electricidad tarda en escasear, pero a largo plazo si no lo tenemos en cuenta obtenemos resultados muy absurdos. Al final he decidido usar para el crecimiento económico una función mixta, que pondere la electricidad y el petróleo:

$$\text{crecimiento} = S_{\text{oil}} * g_{\text{oil}} + (1 - S_{\text{oil}}) * g_{\text{E}}$$

Es decir, cuando $S_{\text{oil}}=0$, que quiere decir que se ha completado la transformación de petróleo a electricidad, la economía no depende del petróleo sino únicamente de la electricidad.

$$g_{\text{oil}} = \text{IF}(\text{abundance_oil} > -0.01, \text{max_growth}, \text{deriv_oil})$$

$g_{\text{E}} = \text{IF}(\text{abundance_E} > -0.01, \text{max_growth}, -0.01)$ (esto es un poco arbitrario y abrupto, lo sé, estoy trabajando en ello para mejorarlo)

Y la abundancia de petróleo también se ve ponderada por el grado de sustitución del petróleo,

$$\text{abundance_oil} = S_{\text{oil}} * ((\text{max_extraction_oil} - \text{demand_oil}))$$

aunque esto no nos influye mucho en el resto del modelo, porque solo la usamos para saber si es mayor o menor que cero (es decir, que no actuamos para nada a largo plazo, si la energía escasea hoy tomamos medidas, tanto porque la economía se resiente como porque empezamos a cambiar de modelo productivo, esto parece muy bruto pero es lo que hay realmente). Además se ha añadido un retardo en que la escasez empieza a afectar a la economía de tres años.

Generación de electricidad no renovable

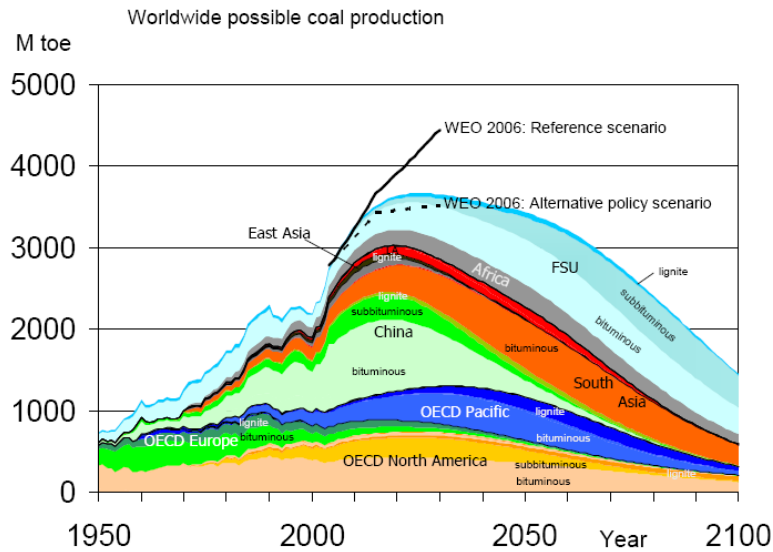
La energía eléctrica se suministra de dos maneras: bien con combustibles renovables o bien con no renovables. Hemos englobado en los combustibles no renovables al carbón el gas natural (e incluso el uranio). Y dentro de las renovables distinguimos la hidráulica que representa ya un 16% de la electricidad mundial, pero que presenta perspectivas de crecimiento muy escasas debido a que ya están muy saturados los emplazamientos.

En el tema de la energía hidráulica deberíamos hacer un estudio aparte que prevea un crecimiento moderado de esta energía a nivel mundial (porque en realidad se ha saturado en el mundo desarrollado pero tiene perspectivas importantes en países en desarrollo), pero de momento lo vamos a dejar así. Se la considera energía renovable (aunque esto es discutible) pero no se la tiene en cuenta a la hora de aumentar porcentualmente las energías renovables.

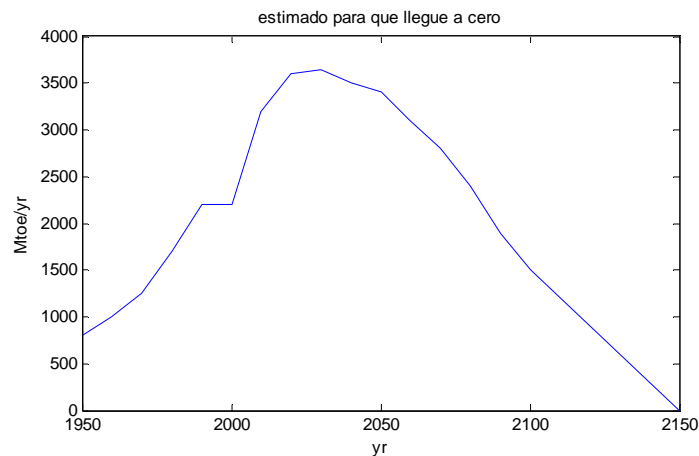
El valor de la energía hidráulica que tomamos es:

3121TWh/yr , que son lo que hay en 2006 segun IEA key stats, que suponemos que ya no va a crecer mucho.

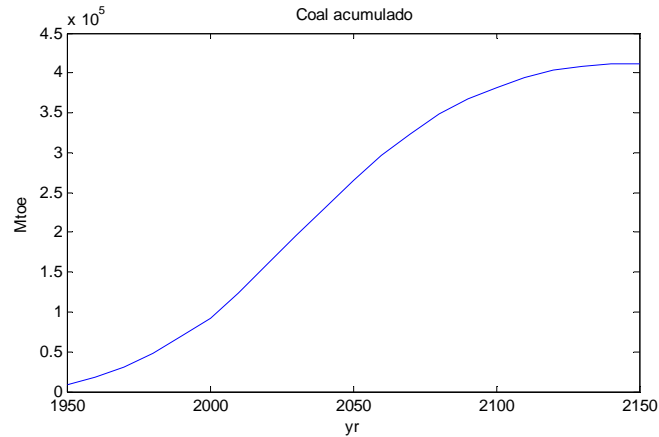
Vamos a ver las curvas de extracción de gas natural y petróleo para conseguir hacer una curva de producción máxima en función de las reservas, como hicimos con el petróleo en el modelo0. La curva de extracción máxima de carbón que propone el Energy Watch Group en su Coal Report 2007 es de la figura 23:



Un problema de esta curva es que no llega más que hasta 2100 y el carbón extraíble no llega a cero, y esto nos hace falta para calcular el carbón total restante. Extrapolo esta curva hasta llegar a cero y me queda algo similar a la curva de la figura 24



Y sumando el carbón acumulado consumido y estimado con esta curva me queda la curva de la figura



Me salen unas 4.11e5 Mtoe totales de reservas acumuladas desde 1950 y extraíbles y he añadido a la curva de EWG unos 2.8e4 Mtoe (con la extrapolación). Los datos que se extraen de esta curva son:

Máximo de extracción = 3600 Mtoe/yr actualmente consumo (2007)=3000 Mtoe/yr con lo cual el máximo es $1 - (3000/3650) = 0.18$, no llega a un 20% mayor que el consumo actual (aunque Bermejo habla de un 30% como máximo, pero no sé si toma el nivel de 2005, 2007,..el carbón ha crecido tan rápidamente y la curva es tan difusa...).

Años con el nivel actual de extracción: el carbón consumido (sumado) hasta 2010= 1.235e4 Mtoe , con lo cual

$$(4e5 - 1.235e4) / 3200 = 121 \text{ años}$$

$$(4e5 - 1.235e4) / 3000 = 129 \text{ años entre 120-130 años al consumo actual}$$

Vamos a extrapolar esta tendencia al consumo de energía eléctrica en general, haciendo que su curva de extracción máxima sea paralela a la de la extracción máxima del carbón (luego veremos que la curva del gas natural no difiere mucho de esta tampoco). De forma que los valores de esta curva será para el caso de la electricidad

para la y: max ext: 20% más del actual

equivale para la curva de la electricidad a

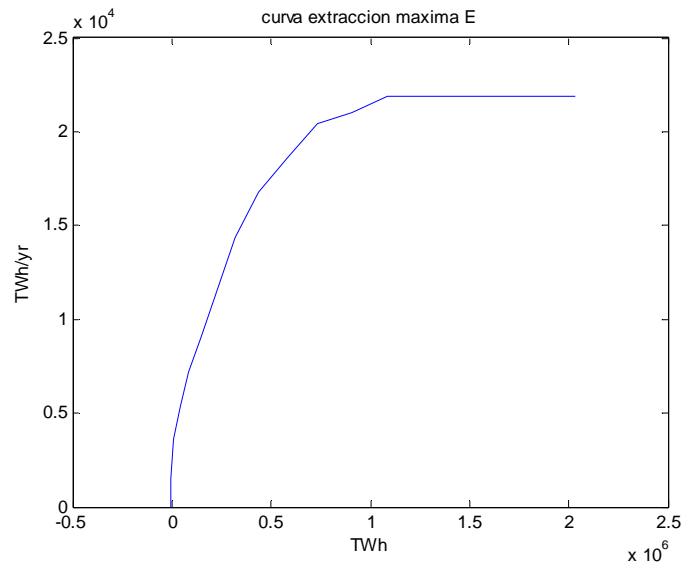
$$(2e4 \text{TWh/yr} - 3121 \text{Thw/yr hidro}) * 1.2 = 2.0255e+004$$

$$(2e4 \text{TWh/yr} - 3121 \text{Thw/yr hidro}) * 1.3 = 2.1943e+004$$

esto es lo que ponemos en la curva (30%)

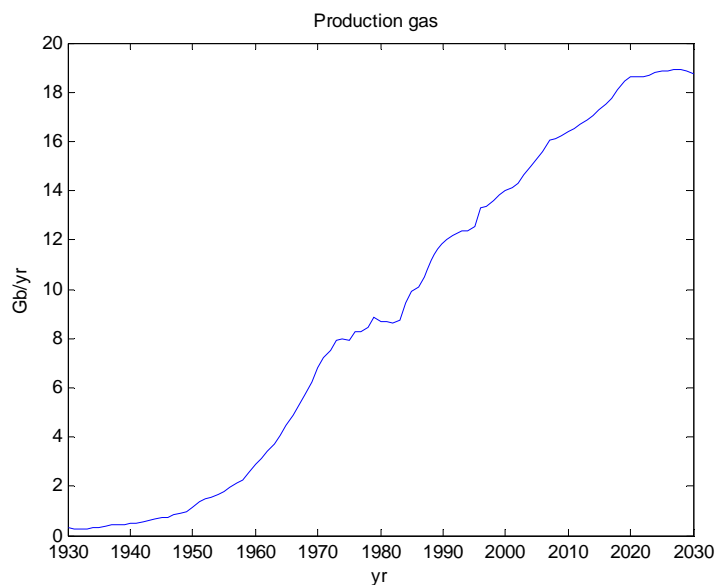
y para la x, las reservas totales de carbón son 120 años al consumo actual y para la electricidad sería: $120 * (2e4TWh/yr - 3121TWh/yr \text{ de hidro}) = 202.5480e4 TWh/yr$

Y esto nos da el perfil de la figura...



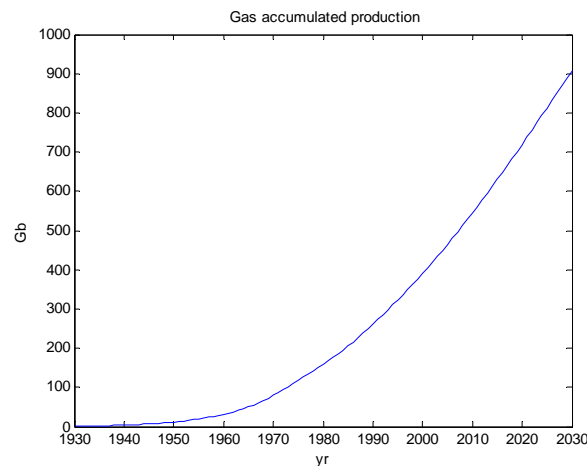
El carbón no es el único combustible que nos sirve para generar energía eléctrica, por supuesto, el gas natural y el uranio son también combustibles muy ampliamente utilizados. Según IEA keystats, en 2006, teníamos un 41% de generación eléctrica usando carbón, un 20% gas y un 14% nuclear. Si el gas y el carbón tienen perfiles de agotamiento similares entonces la curva anterior nos sirve para prácticamente toda la electricidad de origen no renovable (80%).

El perfil de posible agotamiento del gas natural que nos da ASPO es el de la figura



Sólo tenemos datos hasta 2030, fecha en que se empieza a sentir el cénit, en este aspecto coincide con la curva del carbón en el cual el cénit también aparece sobre 2025.

Si suponemos que el cénit aparece cuando se han consumido la mitad de las reservas aproximadamente podríamos estimar los dos parámetros que hemos usado para el carbón: el máximo de extracción comparado con el consumo actual y los años de reservas al consumo actual.



Las reservas para el gas llegan a 900 Gb si multiplicamos por dos son 1800 Gb de URR, si el consumo en la actualidad está en los 16 Gb/yr aproximadamente $900 \cdot 2 / 16 = 113$, similar a los 120 del carbón, un poco menor...

Y la extracción máxima del gas 18.9 Gb/yr $18.9 / 16 = 1.18$, no llega al 20% más de la extracción actual, menos que el carbón que estaba entre 20% y 30%.

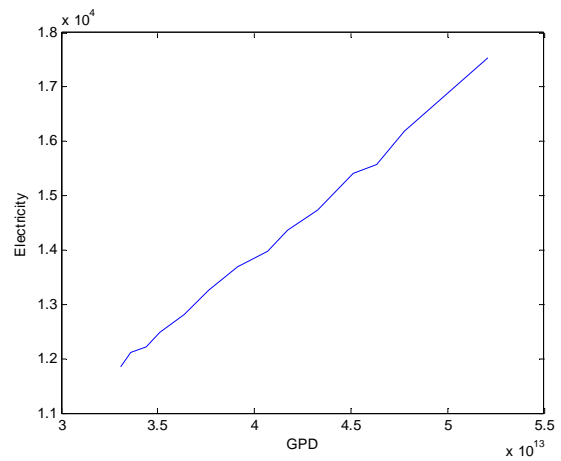
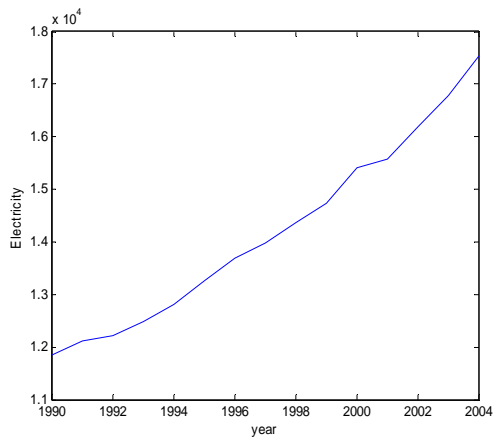
Por tanto las curvas de gas y carbón son similares en cuanto al momento en que empiezan a declinar según las estimaciones, el gas tiene menores reservas y menor tope límite, pero son similares. Poniendo un 30% más de extracción respecto a la actual yo creo que estamos siendo optimistas, un 20% quizá sería más realista, sobre todo porque no tenemos en cuenta el TRE decreciente de este tipo de energías, pero de momento vamos a ser optimistas y a tomar los datos del carbón. Esto tendremos que modificarlo cambiando la curva de extracción máxima.

Demanda de energía eléctrica

Usamos una recta para extrapolar el consumo de energía eléctrica en función del PIB según las tendencias de los últimos años, y le añadimos la energía eléctrica necesaria para transformar la movilidad de petróleo a electricidad:

$$\text{demand_E} = F_E \cdot ((1.2e4 + 244 \cdot (\text{GDP} - 33))) + \text{oil_to_E} \quad (\text{ya en T\$})$$

$$(2.4444e-010 \text{ TWh/yr\$} = (1.75e4 - 1.2e4) / (5.55e13 - 3.3e13))$$



También usamos el parámetro F_E para modelar la eficiencia energética de la sociedad y ponemos que pueda ir disminuyendo si se gasta menos energía por unidad de PIB:

$$\text{IF}(\text{abundance_E} \leq 0, 0.0 * (F_E - \text{min_FE}) / (1 - \text{minFE}), 0)$$

Pero la verdad es que este parámetros de momento no vamos a usarlo, lo dejaremos estar porque no sabemos si, en tiempos de crisis, la eficiencia aumenta, ya que puede que incluso disminuya.

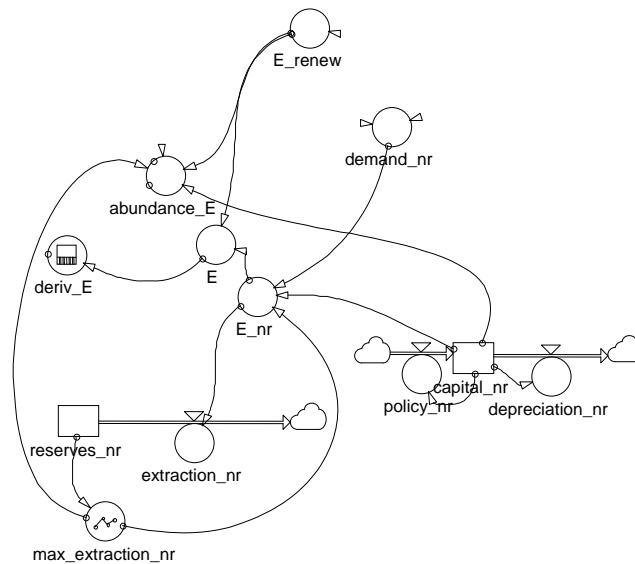


Figura... : extracción de energía no renovable y capital para energía no renovable

Capital no renovable

El capital no renovable nos daría cuenta de la infraestructura que podemos usar para gastar combustibles no renovables para electricidad, si no lo aumentamos no tenemos centrales térmicas y no podemos generar electricidad no renovable aunque tengamos reservas. Lo voy a dejar constante al nivel de 2008, porque considero que (bien por el cambio climático o por mi política) toda la electricidad extra que voy a necesitar para el cambio al transporte eléctrico y para crecer la voy a intentar sacar de renovables. Esto es simplemente el experimento que quiero hacer, no es que sea realista. La extracción de energía eléctrica de origen no renovable es, por tanto:

$$\text{MAX}(0, \text{MIN}(\text{demand_nr}, \text{capital_nr}, \text{max_extraction_nr}))$$

Y la demanda de electricidad no renovable es el resultado de restar a la energía demandada por el GDP (más la demandada por el “coche eléctrico”) la energía renovable producida y la hidroeléctrica, que la consideramos constante durante toda la simulación.

La verdad es que el poner este límite o no ponerlo no cambia mucho el resultado de la mayor parte de las simulaciones.

Las energías renovables

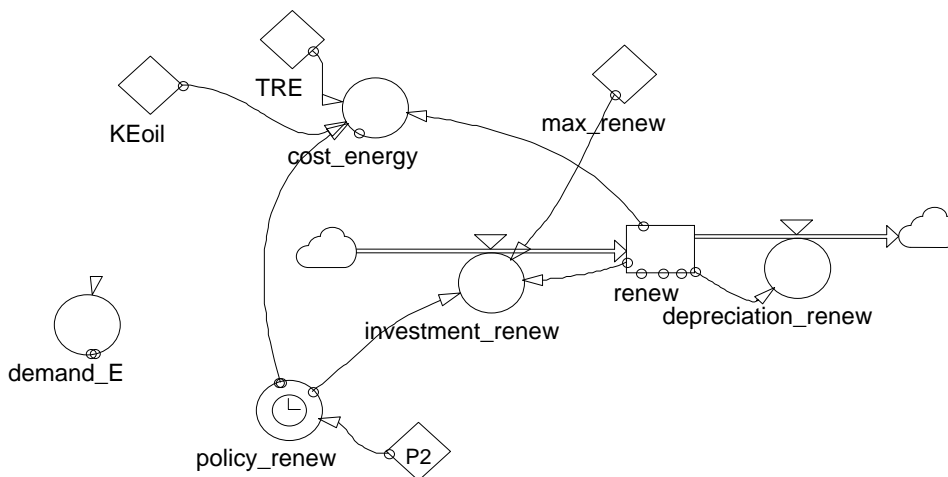


Figura... : parte del modelo de generación de energía renovable

Renew inicialmente vale.....el 2.3% de la energía eléctrica consumida en el mundo actualmente ya que según IEA stats (2006) es el $0.023 * 2e4 \text{ TWh/yr} = 460 \text{ TWh/yr}$ de capacidad de generación renovable

Poniendo en 1985, 1.95TWh/yr y un crecimiento del 28% histórico (creo que sacado de los datos de Bermejo, pero da igual, porque a partir de 2008 cambia esta política, el caso es que el valor en 2006 es más o menos 460—da 440)

La conversión petróleo-electricidad

E --> oil

este es el factor que se usa al calcular la TRE y la energía requerida para construir los equipos que generan energía renovable. Como la TRE se calcula en unidades de energía estándar usamos esta equivalencia típica. Según BP statistical review

1 toe = 7.33 barriles petróleo equivalentes; según wiki 1 toe= 11630 KWh (y según IEA stats)

luego: 7.33 b = 11630 KWh

7.33 e-9 Gb = 11630 e-9 TWh

$K_{\text{Eoil}} = 7.33/11630 = 6.303e-4 \text{ Gb/TWh}$

oil --> E

para esta otra conversión usamos la equivalencia de consumo del coche eléctrico, según datos de PPP.

Megane 6 litros/100 Km, 13200 litros en 11 años vida útil

1 barril 103 litros combustible según PPP,

Eléctrico Mitsubishi 19950 KWh en 11 años vida útil (solo coste operación)

19950 KWh (en 11 años)

$19950 \text{ e-9 TWh} * 1.15 \text{ (perdidas transporte E)} / (13200 \text{ litros}/103 \text{ l/barril}) \text{ e-9 Gb/b} =$

$179 \text{ TWh/Gb} = 180 \text{ TWh/Gb} = K_{\text{oilE}}$

Change to E

El cambio inicial a energía eléctrica equivale a la energía que se gasta antes de empezar a sustituir el petróleo por electricidad, podemos suponer que este es la energía eléctrica (o el porcentaje de petróleo equivalente) .

Según IEA stats 2008 el 1.7% de la electricidad que se usa en el mundo se destina a transporte, como el consumo son

$$1327 \text{ Mtoe/yr} \text{ totales} * 0.017 = 22.899 \text{ Mtoe/yr}$$

$$1 \text{ toe} = 11630 \text{ kWh} = 11.630 \text{ e-6 TWh}$$

$$22.899 \text{ Mtoe/yr} * 1\text{e}6 \text{ toe/Mtoe} * 11630\text{e-9 TWh/toe} = 266.3 \text{ TWh/yr}$$

esto es la electricidad que se consume al año actualmente en transporte, si lo pasamos al petróleo equivalente usando la conversión del coche eléctrico nos sale:

$$266.3 \text{ TWh/yr} * (1/180) \text{ Gb/TWh} = 1.4794 \text{ Gb/yr}$$

de un total de consumo actual de 30 Gb/yr sale un

$$1.4794\text{e}6 \text{ Gb} / 30 \text{ Gb} = 0.049 \text{ 4.9 \% del consumo de oil ya ha pasado a electricidad, este es el valor inicial de change_to_E}$$

Coste económico de las renovables

Según PPP para la eólica tenemos 1.2e6 euros/Mw de potencia instalada, más un 8% de mantenimiento (aunque el mantenimiento no debería tenerlo en cuenta aquí, porque sólo son los gastos iniciales los que pongo aquí), el mantenimiento de las centrales térmicas ya está metido en el PIB y sería el equivalente del mantenimiento de las renovables, pero bueno...como tengo que tener las centrales térmicas también mantenidas y duplicadas en ocasiones...quizá lo dejo.

$$1.2\text{e}6 \text{ euros} * 1.4 \text{ \$/euro} * 1\text{e}6 \text{ MWh} * \text{T\$}$$

$$\text{MW} * (2000 \text{ h/yr} * 25 \text{ yr}) * \text{TWh} * 1\text{e}12\text{\$}$$

$$= 0.336 \text{ e-4 T\$/TWh}$$

Esto lo multiplico por dos o por tres o por más para tener en cuenta los gastos asociados al cambio en general: redes de distribución, gasolineras, infraestructuras....

y si fuera teniendo en cuenta el 8% de mantenimiento en 25 años:

$$1,008\text{e-4 T\$/TWh}$$

Valor máximo de renovables

El techo de la energía renovable es una variable muy importante para mis modelos a largo plazo, pero...la verdad llevo meses devanándome los sesos con ello y no he llegado a ninguna conclusión. Están los informes de Greenpeace (por cierto, a ver si me ojeo el nuevo de solar que han sacado), está el hecho del número de proyectos eólicos en España (que suelen estar por encima de las 2000 horas estimadas es decir que son bastante viables) que duplica más o menos la capacidad ya instalada, están las infraestructuras de redes que suelen ser el verdadero cuello de botella... Un 30% respecto al consumo actual de techo para la eólica terrestre (el doble de lo actualmente en marcha en España) y un 10% para la marina y un...50% para la solar termoeléctrica??...eso sumaría un 90%, y no me parece descabellado. Yo creo que un 100% respecto al consumo eléctrico actual no es algo imposible (a largo plazo, eso si), duplicar el consumo actual de energía eléctrica sólo con renovables, por ejemplo....me parece difícil. Pero, la verdad, esto daría como para una o dos o tres tesis doctorales .No tengo ni idea. Lo más que se puede hacer es variar este parámetro.

Coste energético de las renovables

Si tengo una TRE y una vida util dada:

coste renovables =(renew_invest TWh/yr * TRE * KE_oil GB/TWh / life_time) *(1-change_to_E)

estos serán los barriles de petróleo que tengo que añadir al consumo, los añado sólo mientras sigo usando petróleo, si change_to_E se hace 1 ya no necesito petróleo, necesitaría energía eléctrica, por ello esto debería sumarse a la demanda eléctrica. No lo he hecho en el modelo porque si lo hago se me genera un lazo algebraico que me va a dar lugar a inestabilidades y esta parte no es tan importante en el modelo, el consumo de energía para implantar renovables la verdad es que es bajo comparado con el consumo global.