

# Simulación energética

## ¿Es posible la transición de una economía fósil a una renovable?

Margarita Mediavilla Pascual  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad de Valladolid

¿Qué pasa con una sociedad industrial basada en energías no renovables que se va quedando sin ellas? ¿Cómo puede realizarse la transición de un mundo basado en energías no renovables a otro basado en renovables? ¿Es imposible? Hay muchos que opinan que sí, que sin la energía de los combustibles fósiles los aerogeneradores, las redes eléctricas y los paneles solares no se pueden construir y todo se viene abajo.

Enerficción sólo es un juego, no intenta describir toda la realidad, sino únicamente sus aspectos más básicos. Es un intento de describir los comportamientos elementales de un mundo industrial que tiende a crecer exponencialmente y donde las no renovables declinan y pueden ser sustituidas por energías renovables. La simulación es dinámica, es decir, tiene en cuenta los factores temporales que hacen que el resultado final sea uno u otro.

Los datos no intentan ser demasiado realistas, aunque se ha intentado que no sean descabellados. Es sólo un juego. A pesar de todo, los juegos, a veces, describen mejor la realidad que muchas páginas de argumentos y datos.

### 1. Enerficción

Enerficción es una simulación de un modelo de “mundo” creado con las mismas herramientas matemáticas que usaron Meadows y Rangers en su informe sobre los límites del crecimiento: la dinámica de sistemas. La dinámica de sistemas no tiene ningún misterio, se basa en utilizar ecuaciones matemáticas (ecuaciones diferenciales, es decir, que tienen en cuenta el tiempo y las derivadas) para describir los comportamientos y usar simulaciones por ordenador para ver los resultados. Además la dinámica de sistemas incorpora unas herramientas gráficas muy intuitivas que ayudan a visualizar los fenómenos de forma muy eficaz. Al ser muy intuitiva es fácil de entender para gente no iniciada en simulaciones “ingenieriles”.

La dinámica de sistemas tiene un requisito: intenta abarcar los sistemas en su totalidad, no sólo aspectos parciales, y, debido a ello, se necesitan abstraer los problemas. Vamos a intentar abstraer, por tanto, el problema de la energía en una sociedad industrial, creando un “mundo” que llamamos enerficción.

- En el mundo de enerficción hay una cantidad de lo que llamamos “capital material” (máquinas, viviendas, infraestructuras...) todos los bienes materiales que consumen energía. Inicialmente esa energía viene de unos recursos no renovables que se van agotando y, en un porcentaje minoritario, de recursos renovables.
- El capital material no equivale al “capital” de los economistas o al PIB o a otra magnitud económica. Estamos tratando sólo los aspectos materiales. Los aspectos económicos son muy interesantes también, pero más abstractos y difíciles de tratar. Si el capital material disminuye, indica que la cantidad de máquinas, herramientas, coches, edificios, aviones, etc en funcionamiento y

consumiendo energía en el mundo disminuye. Eso puede implicar una recesión económica y un caos social, o simplemente, que la sociedad se vuelve menos consumista pero sigue conservando su calidad de vida y su estabilidad política. Para modelar las variables económicas o políticas que indican si hay una recesión o revueltas sociales por la crisis energética necesitaríamos modelos mucho más complejos que este. De momento obviamos esos aspectos.

- Si hay suficiente energía disponible el capital material tiende a crecer en términos netos. Es decir, se van creando nuevas máquinas a un ritmo mayor que la obsolescencia de las más antiguas. Esto es una forma de imitar la tendencia al crecimiento exponencial de nuestra economía.
- La relación entre el capital material y la energía se ha tomado constante e igual a 1. Se puede variar este parámetro suponiendo una eficiencia variable, pero, de momento se ha visto que la eficiencia no aporta demasiado y no está muy claro realmente si tiende a aumentar o a disminuir.
- El consumo de energía es proporcional al capital material que tenemos. La primera energía que se utiliza es la renovable, lo que no se puede cubrir con la infraestructura renovable existente se cubre con la no renovable.
- La energía no renovable no se puede extraer a cualquier ritmo. Cuando comienza a escasear el stock la extracción es más lenta ya que es más difícil y costoso extraerla. Tampoco se puede extraer cualquier cantidad de energía renovable, hace falta tener infraestructura renovable para ello.
- Cuando la energía que se puede extraer es menor que la necesaria suceden dos cosas. Por una parte se incrementa la inversión destinada a energías renovables y por otra, si no hay energía para mover el capital material, su crecimiento se frena.
- Para extraer más energía renovable hay que invertir capital material en ello. Esto se hace destinando una cantidad del crecimiento material anual a infraestructura renovable. Esto quiere decir que si el crecimiento del capital material es muy pequeño podemos dedicar muy poca cantidad a infraestructura renovable. También es posible que se invierta en renovables cuando el crecimiento es cero (se descartan máquinas obsoletas para invertir en infraestructura renovable) pero se hace a costa de mayor decrecimiento material. Una vez que la infraestructura renovable se ha construido produce energía hasta que el equipo se queda obsoleto.

## 2. Variables y ecuaciones.

A partir de ahora las variables se llamarán en inglés (lo siento, pero es así) y la coma decimal es sustituida por el punto, además las variables porcentuales están tomadas en tantos por uno (es decir un 20% es un 0.2, por ejemplo).

Consideramos tres variables especialmente importantes en el modelo, que son las que llamamos variables de “stock”. Son variables de stock porque se acumulan en el tiempo, como se acumula el agua en un depósito cuando es llenado por un grifo.

**Material\_capital** es una de estas variables. Como ya hemos dicho nos habla de la cantidad de “aparatos” que consumen energía, por ello su definición es algo vaga. La vamos a medir en lo que llamamos unidades de capital material (umc), y consideramos que, al inicio de la simulación su valor es 1 umc.

Las derivadas de esta función son sus ritmos de crecimiento y decrecimiento (es decir, el “grifo” y el “sumidero” de agua, en la comparación del depósito), que llamamos *growth\_of\_material\_capital* y *depreciation\_of\_material\_capital*, de forma que:

$$\frac{d(\text{material\_capital})}{dt} = \text{growth\_material\_capital} - \text{depreciation\_of\_material\_capital}$$

Se ha tomado un ritmo de depreciación anual del capital material de un 7.14% anual (14 años de vida media). El crecimiento de *material\_capital*, por otra parte depende de la cantidad de energía de que dispongamos. Si la energía es abundante se toma el valor máximo que es un 11.1% (un 4% de crecimiento neto).

El capital material inicial de 1 umc requiere una energía anual que viene dada por su **consum\_E**, es decir, la energía gastada por cada unidad de capital material. Hemos hecho  $\text{consum\_E} = 1 \text{ ue}/(\text{ucm}\cdot\text{yr})$ .

**Renewable\_extraction** es el ritmo de extracción de energías renovables que podemos usar en cada momento. Nos habla del número de centrales de generación de energía renovable. Es un stock porque se va acumulando según invertimos en nuevas centrales, y éstas se van depreciando con el tiempo.

$$\frac{d(\text{renewable\_extraction})}{dt} = \text{increase\_renew\_capital} - \text{depreciation\_renew\_capital}$$

Este stock (*renewable\_extraction*) se mide en unidades de energía por año (ue/yr), ya que es una capacidad de producción anual de energía, mientras que sus derivadas toman las unidades de  $\text{ue}/\text{yr}^2$ , puesto que representan el ritmo anual de depreciación de una capacidad de producir energía cada año. El ritmo de depreciación del capital renovable es del 2% (50 años de vida media).

**Non\_renew\_resources** es la tercera variable de stock y describe la cantidad de energía no renovable que puede extraerse. Se mide en unidades de energía (ue) y se va vaciando según se extraer energía no renovable.

$$\frac{d(\text{non\_renew\_resources})}{dt} = \text{non\_renew\_extraction} = f(\text{limit\_non\_renew\_extraction})$$

**Non\_renew\_extraction** es la cantidad de energía no renovable que se extrae cada año y es el mínimo entre la energía no renovable demandada (*demand\_non\_renew*) y el límite extraíble (*limit\_non\_renew\_extraction*). Este límite es una función de la energía no renovable en stock, es decir, cuando el stock de energía no renovable comienza a escasear el ritmo de extracción es menor. Viene definido por tablas como las de la figura 1, que imitan el comportamiento de una campana de Hubbert.

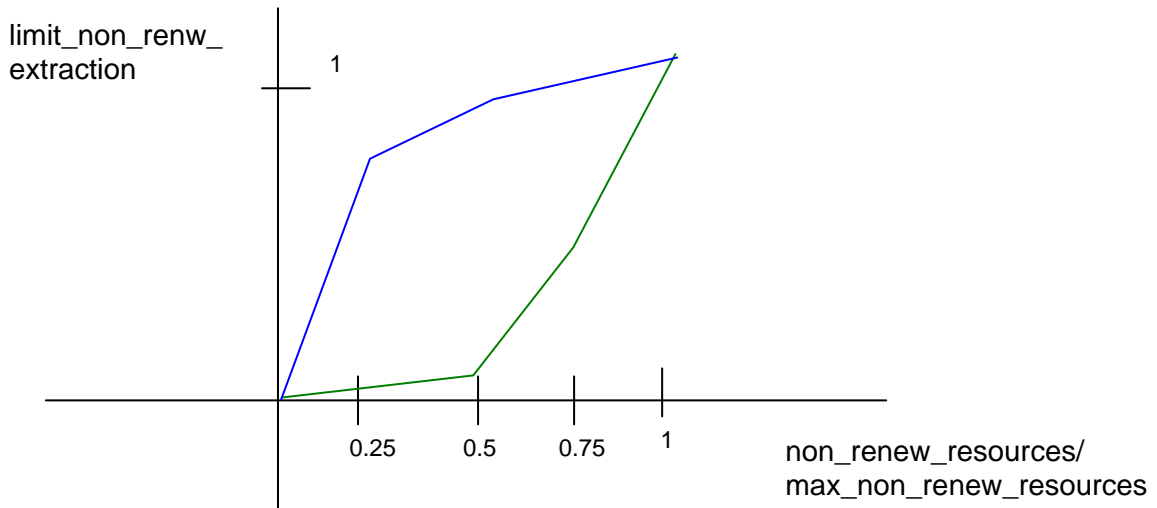


Figura 1: Gráfico de non\_renew\_extraction

— pico  
— meseta

**Max\_non\_renew\_resources** indica la cantidad de energía no renovable en stock (en ue). Como al principio de la simulación se extrae una unidad de energía (ue) al año, indica el número de años que se puede extraer al ritmo actual. Lo hemos hecho igual a 40, 60 y 100.

**Energy available** es la energía disponible. Es la suma de *renewable\_extraction* y *limit\_non\_renewable\_extraction*. **Energy abundance** es la resta entre la energía disponible y la consumida (*energy\_use*).

**Intensity** es la relación entre el crecimiento del capital material y la energía disponible. Es un término similar al empleado para la relación incremento de PIB/incremento de energía. Hemos hecho  $intensity=0.1$  umc/ue, es decir, instalar un capital material requiere la energía que consume en 10 años.

Si multiplicamos *energy\_abundance* por *intensity* tenemos lo que hemos llamado **limit\_E**. Esta variable nos indica cual va a ser el máximo crecimiento económico que vamos a poder tener, ya que, si no hay energía disponible para hacer crecer el capital material, éste no puede hacerlo.

**Growth** define el crecimiento material y viene dado por el producto entre el máximo crecimiento porcentual (**maximum\_growth**), que hemos dado un valor de 11,1% (crecimiento neto de un 4%), el capital material y una función adimensional que llamamos **scarcity\_factor**. Este crecimiento viene limitado por la energía disponible, es decir, por *limit\_E*.

Growth es la suma del crecimiento del capital material ( $growth\_of\_material\_capital$ ) y de la inversión en energía renovable ( $energy\_investment$ ). La variable  $energy\_percent$  nos define qué porcentaje de  $growth$  se dedica a crecimiento material y cuál a crecimiento de infraestructura renovable.

$$growth\_material\_capital = growth * (1 - energy\_percent)$$

$$energy\_investment = growth * energy\_percent$$

**Scarcity\_factor** es un factor que añadimos para hacer que el crecimiento material se anticipe a la escasez de energía. Antes de que  $limit\_E$  nos indique que un determinado  $growth\_of\_material\_capital$  no es posible, se puede producir una moderación de este crecimiento por falta de energía. Si  $scarcity\_factor=1$  significa que el crecimiento no se ve influido por la energía. Si  $scarcity\_factor$  es menor de uno el crecimiento económico es frenado. Hemos elegido tres perfiles, como se puede ver en la figura 2:

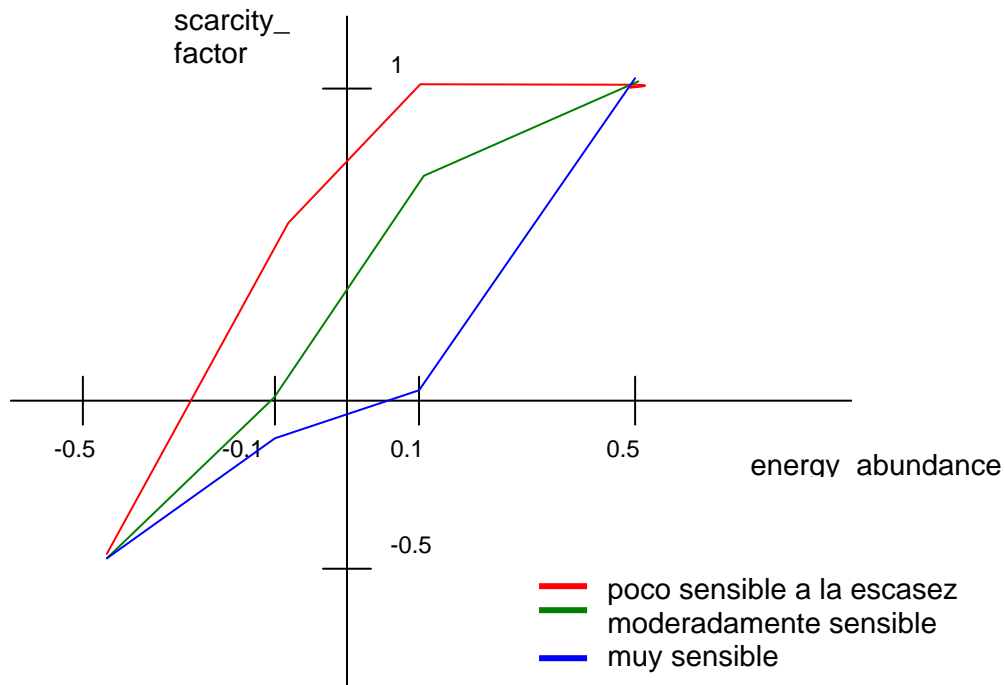


Figura 2: Gráfico de  $scarcity\_factor$

**Energy percent** indica el porcentaje del incremento del capital material que se dedica a construir infraestructura para energía renovable. También es una gráfica con tres posibles perfiles. Por ejemplo, en la figura en la reacción muy lenta si la energía disponible es 0.5 veces mayor que la necesaria no se invierte nada, si es 0.1 veces se invierte un 3% del crecimiento.

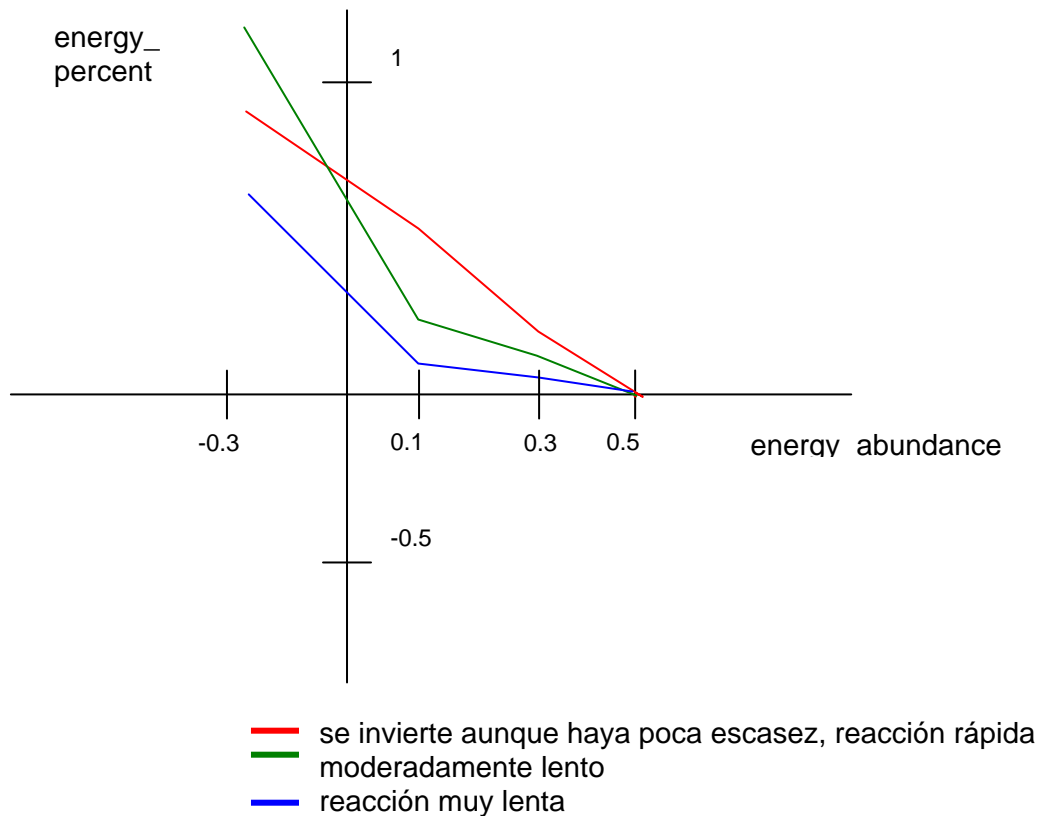


Figura 3: Gráfico de energy\_percent

El detalle del resto de las ecuaciones se puede ver en la figura 4

### Parámetros

Las simulaciones del modelo se han hecho varias veces con diferentes valores de los parámetros. Los parámetros que varían son los siguientes:

- **Non\_renew\_init.** Indica el número de años que podemos seguir consumiendo energías no renovables al ritmo actual. Habla de las reservas totales, no de la cantidad que se puede extraer cada año (que va disminuyendo conforme queda menos reservas). Los valores que toma son: 40, 60 y 100 ue (o años al consumo inicial que es 1ue).
- **renew\_multiplier.** Nos dice cual es la relación entre las unidades de capital material que invertimos en energías renovables y las unidades de capacidad anual de extracción de energía que conseguimos con ello. Este parámetro tiene que ver con la tasa de retorno energético, pues la tasa de retorno energético nos dice las unidades de energía que saco de cada unidad de energía que necesito para crearla. La tasa de retorno energético se suele considerar 30, 10, 5 o incluso 0.9, menor que 1 para algunas tecnologías, es decir, el aerogenerador nos daría en 30 años 30 veces la energía que usamos para fabricarlo. Eso implica que al año daría 30/30 ue/yr por cada ue invertida. Puesto que  $renew\_multiplier \times energy\_percent \times growth$  y tiene unidades de  $ue/(yr \cdot umc)$  tenemos que dividir por la intensidad (intensity) estos valores.

- Scarcity\_factor nos indica lo sensible que es el crecimiento material (debido al crecimiento económico) a la escasez de energía. Si scarcity\_factor=1 significa que el crecimiento no se ve influido por la energía y crece a un ritmo anual del 11%, lo que en términos netos (es decir, descontando el decrecimiento dado por el desgaste de los equipos que es un 7% --14 años de vida útil--, representa un crecimiento del 4%). Si scarcity\_factor es menor de 0.07 (el ritmo de desgaste de los equipos) se produce un decrecimiento económico. Hemos elegido tres perfiles que se pueden ver en la figura 2.
- Energy percent indica el porcentaje del incremento del capital material que se dedica a construir infraestructura para energía renovable. También es una gráfica con tres posibles perfiles que se pueden ver en la figura 3.
- Limit non renewable extraction es el límite de energía no renovable que podemos extraer, y que depende del stock que queda. Tiene dos formas, meseta y pico. (ver figura 1)

El modelo completo se puede ver en la figura 4.

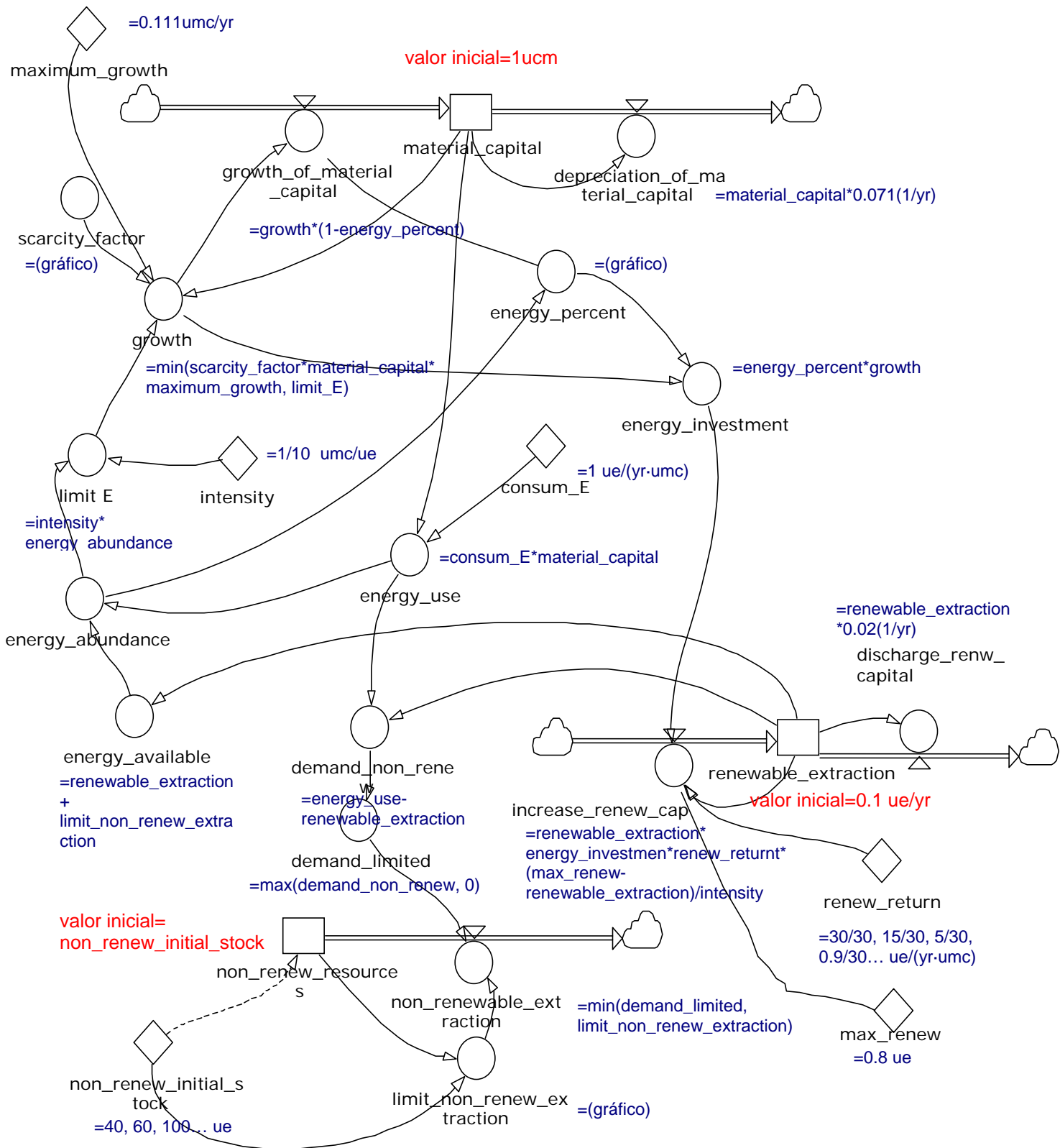


Figura 4: Diagrama de Forrester del modelo de enerficción completo



### 3. Realimentaciones y tendencias

Podríamos ver las relaciones entre variables con el gráfico de la figura 5. Las flechas indican que existe una relación causa→efecto entre dos variables. Si se pone un signo positivo quiere decir que el incremento de la primera variable causa un incremento de la segunda, y si es negativo el incremento de la primera variable hace decrecer la segunda. Cuando tenemos un lazo cerrado de relaciones causales donde todos los signos son positivos (o bien donde el número de signos negativos es par) tenemos un lazo de realimentación de crecimiento-decrecimiento, que indicamos con un (+). Esto significa una realimentación “explosiva”: el aumento de A aumenta B y ese aumento de B aumenta a su vez a A, que aumenta a B...etc. (O bien lo contrario, disminuye A y eso disminuye B que disminuye A....). Si el número de signos negativos es impar tenemos un lazo que tiende a estabilizar: A aumenta a B, y B disminuye A, con lo cual el valor de A tiende a quedarse constante. Son los lazos que indicamos con (-).

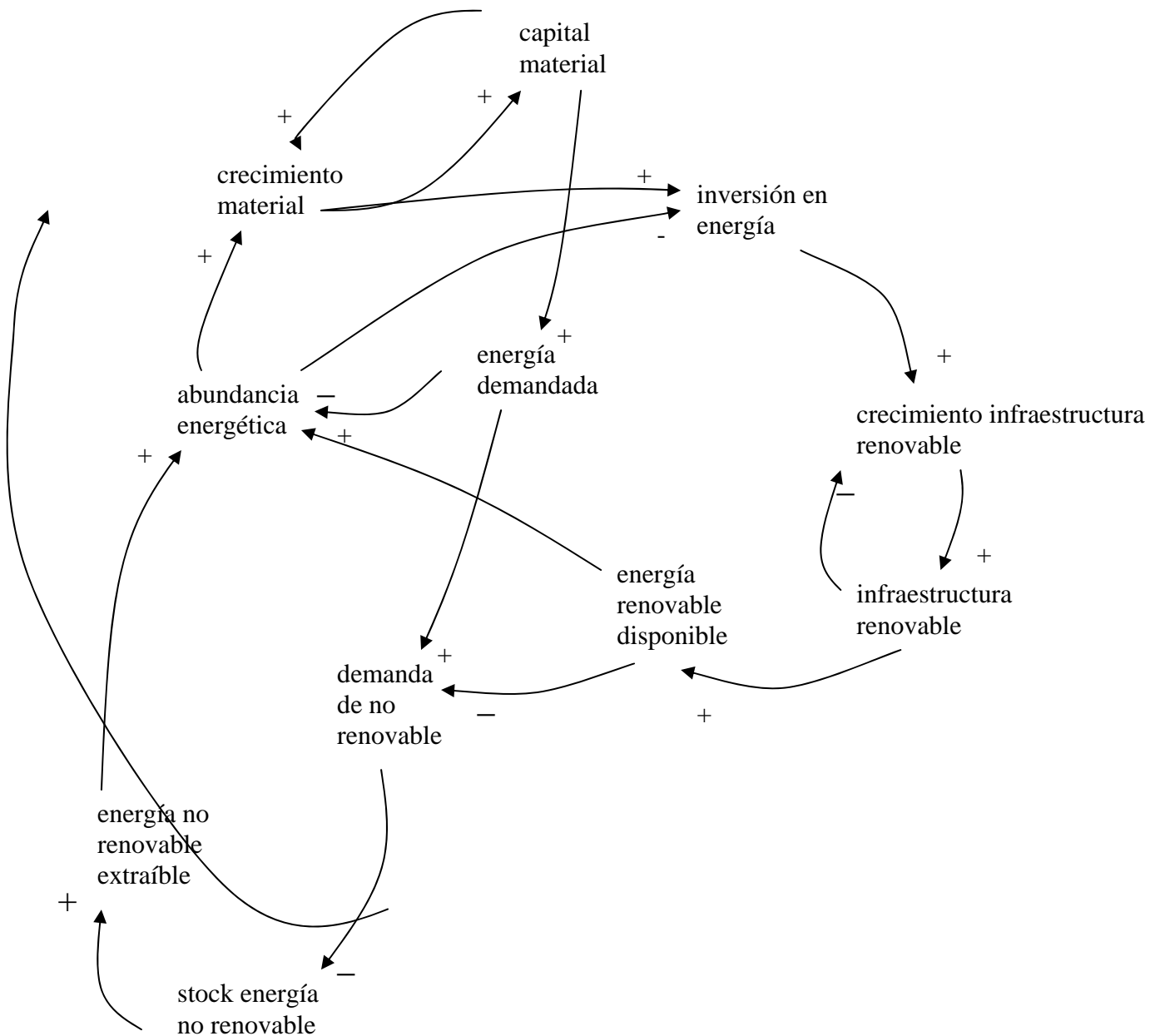


Figura 5: Diagrama de influencias

Vamos a ver los lazos de realimentación que existen. En la figura 6 se observa el lazo "positivo" o de crecimiento/decrecimiento del crecimiento material. Cuando más capital material tenemos, más podemos aumentar este capital material. También aparece un lazo entre el capital material y el stock de energía no renovable: cuanto más crecemos más energía no renovable tenemos y menos podemos gastar, lo que acaba causando que el capital no pueda crecer y nos tendamos a estabilizar. También hay un lazo estabilizante en la infraestructura renovable, que puede crecer, pero hasta llegar a un límite, cuando se acerca a este límite el crecimiento se hace menor hasta que no aumenta más (la inversión es igual a la necesaria para mantener los equipos).

Esto nos dice que tenemos el lazo del crecimiento del capital material que va a tender a crecer exponencialmente, si tiene energía suficiente, pero también puede tener un decrecimiento acelerado hacia el colapso si la energía escasea. El lazo negativo tiende a contrarrestar esta tendencia, a gastar menos cuando hay escasez, pero habrá que ver si la dinámica del crecimiento es más fuerte que la estabilizadora.

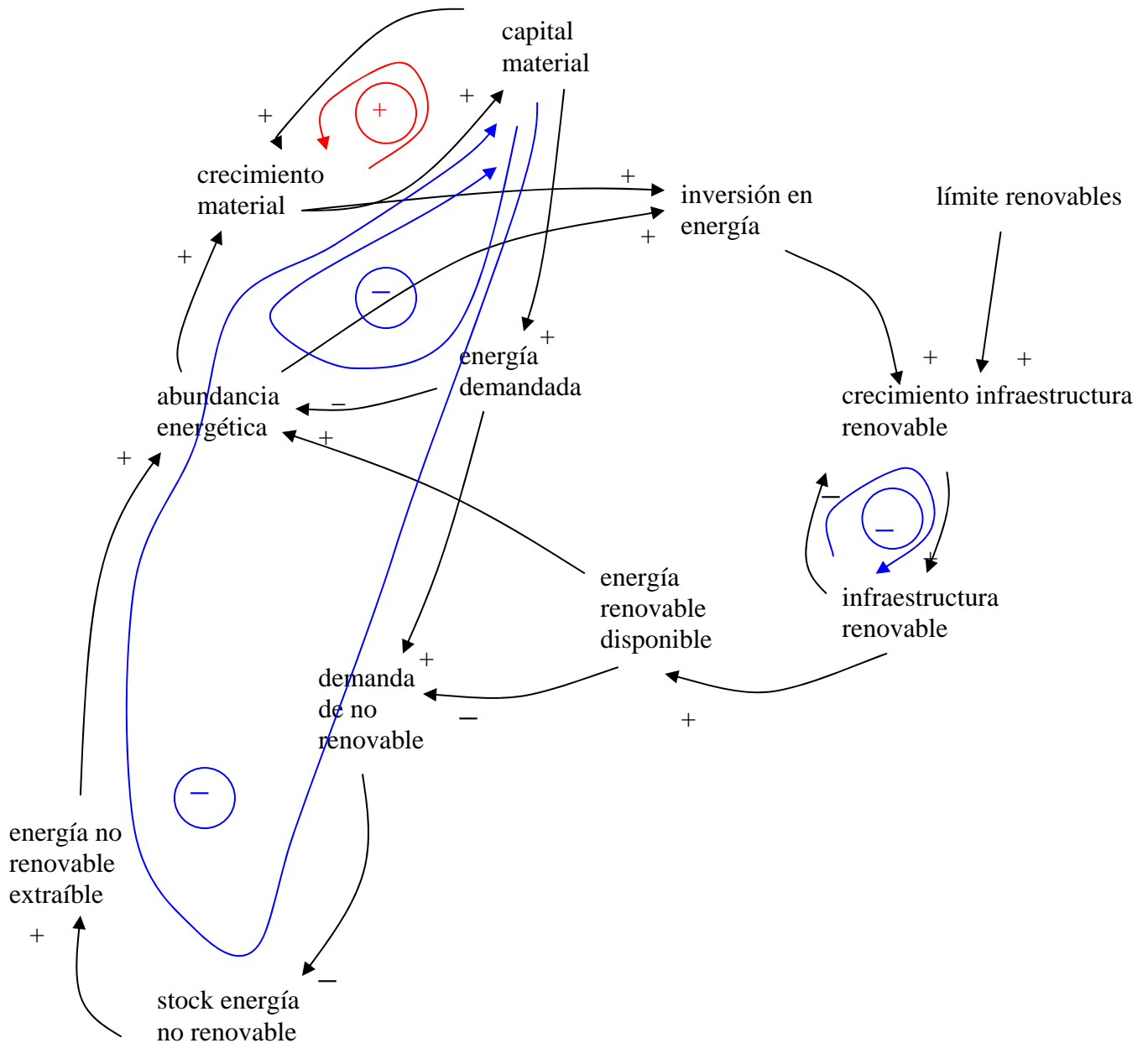


Figura 6: Lazos de realimentación

Los lazos de la figura 7 nos hablan de una relación ambivalente entre el crecimiento y la infraestructura de renovables. Si el crecimiento material es grande, por una parte tenemos más inversión en infraestructura renovable y con ello podemos aumentar la energía disponible y seguir creciendo. Este sería el lazo “virtuoso”, cada vez tenemos más renovables y podemos seguir invirtiendo en ellas. El otro lazo hace lo contrario. Si tenemos más abundancia de energía invertimos menos en renovables (porque no lo necesitamos) y tenemos menos renovables y al final menos crecimiento. Estos dos lazos tienden a compensarse el uno al otro. Con las energías no renovables tenemos dos lazos parecidos.

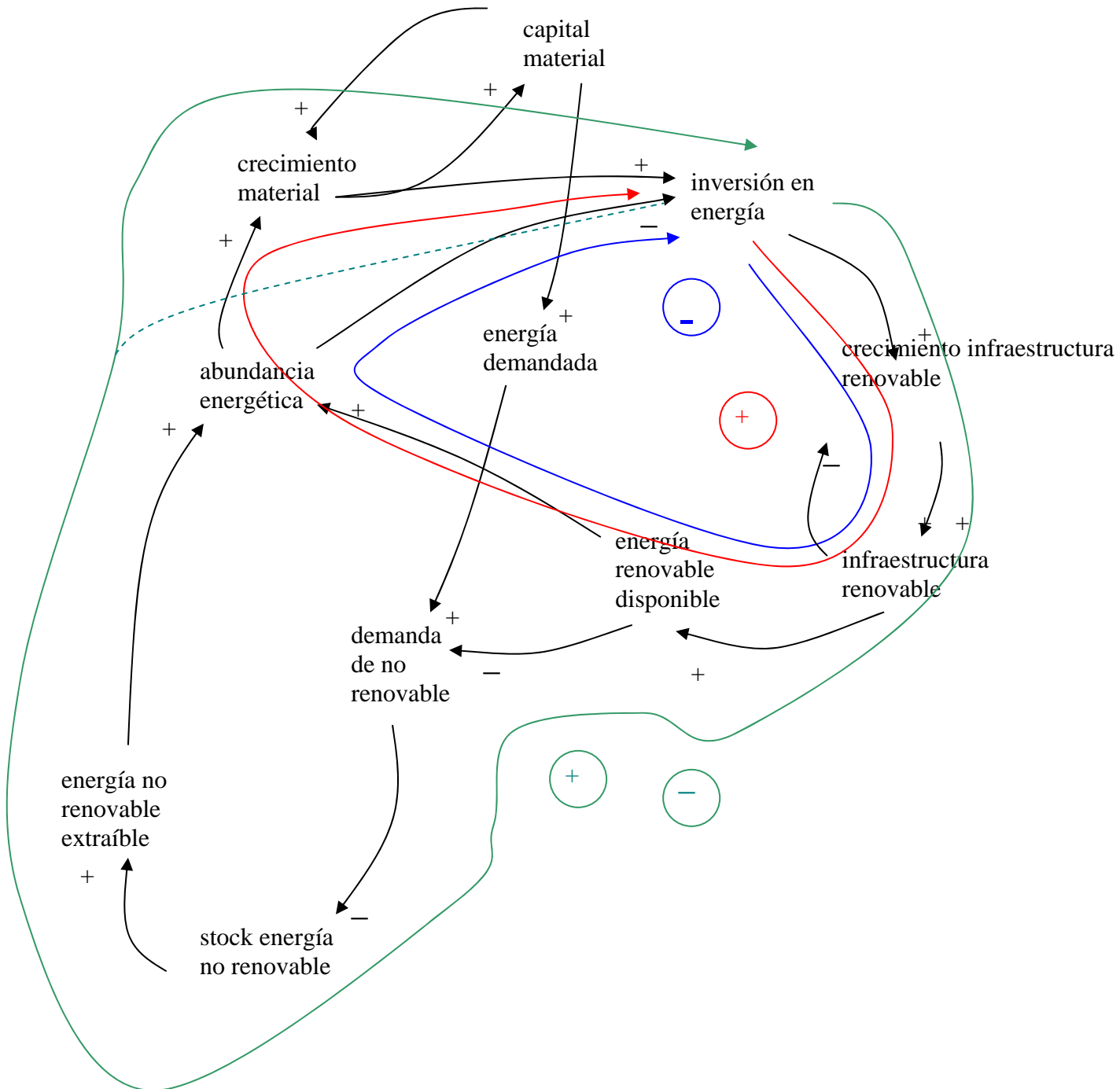


Figura 7: Lazos de realimentación

## 4. Resultados

Veamos los resultados. Se han simulado todas las posibles combinaciones de los valores de los parámetros que se han descrito (tres curvas de Scarcity\_factor, tres curvas de energy\_percent, dos de limit\_non\_renew\_extraction, tres valores de non\_renew\_init, cuatro valores de renew\_return). En principio hay dos tipos de resultados que se pueden clasificar en crisis y en catástrofe. Catástrofe es aquel resultado en el cual el capital material tiende a cero, mientras que en las crisis, después de una bajada, se estabiliza a un valor mayor que cero. Empezamos con una provisión de energías un poco mayores de las necesarias: la energía renovable instalada representa un 10% de la demanda y las no renovables que se pueden extraer son un 1.2 veces la demanda.

### Máximo de energías renovables menor que consumo actual.

Max\_renew=0.8ue

El valor límite de las energías renovables es 0.8 ue. En todos los resultados hay una disminución del capital material, en 108 de los 216 casos esta disminución continua hasta llegar a cero (catástrofe), al disminuir el capital material no se puede invertir en renovables y no se puede invertir la tendencia. En el resto de los casos, después de una caída inicial, se empieza a incrementar la energía renovable hasta llegar a un estado estacionario de capital material más o menos alto. Veamos algunos casos.

### Catástrofe 1

'scarcity factor poco sensible', 'renw lenta', 'pico'  
renew\_return = 0.5 (TRE=15 /30 años)  
non\_renew\_init = 40

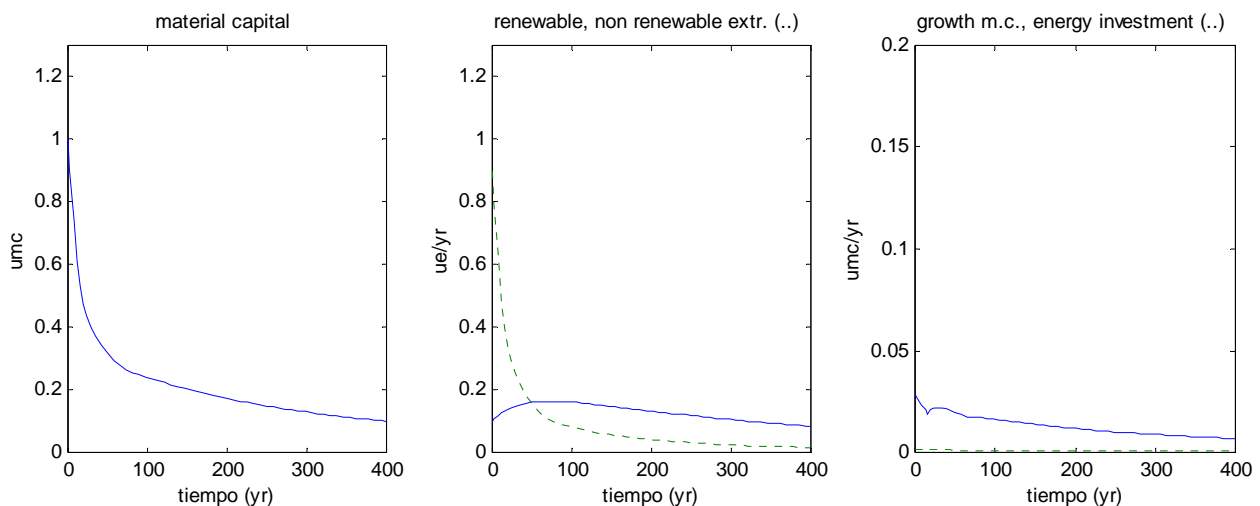


Figura 8

### Crisis 1: respuesta rápida y valor final alto

'scarcity factor poco sensible', 'renw rapida', 'pico'  
renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
non\_renew\_init = 40

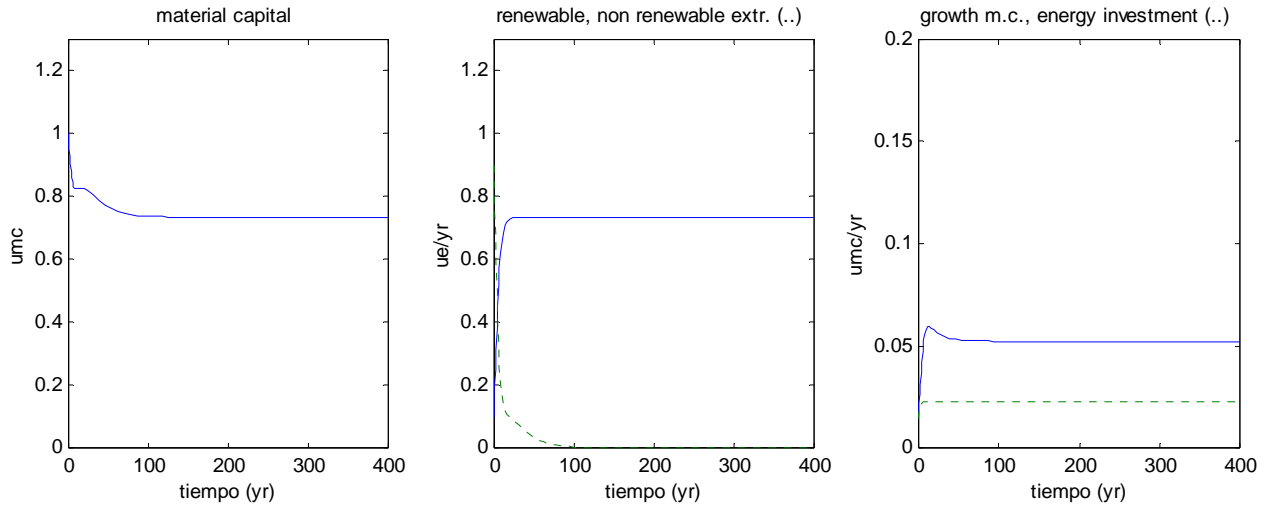


Figura 9

### Crisis 2 : valor final bajo

'scarcity factor muy sensible', 'renw lenta', 'meseta'  
renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
non\_renew\_init = 40

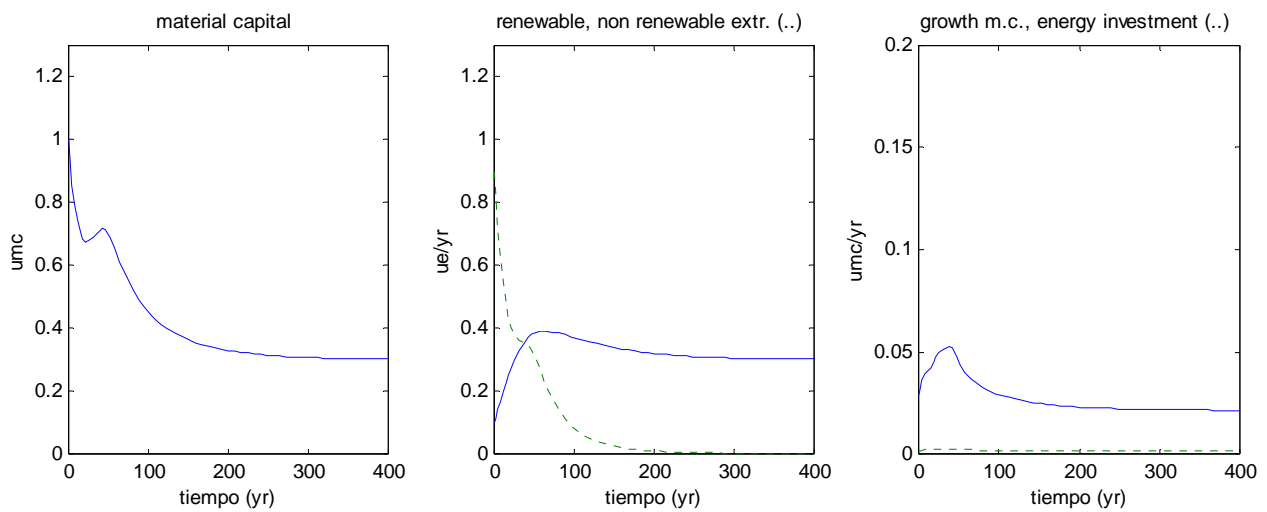


Figura 10

### Crisis 3 : valor final alto

'scarcity factor muy sensible', 'renw rápida', 'pico'  
renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
non\_renew\_init = 100

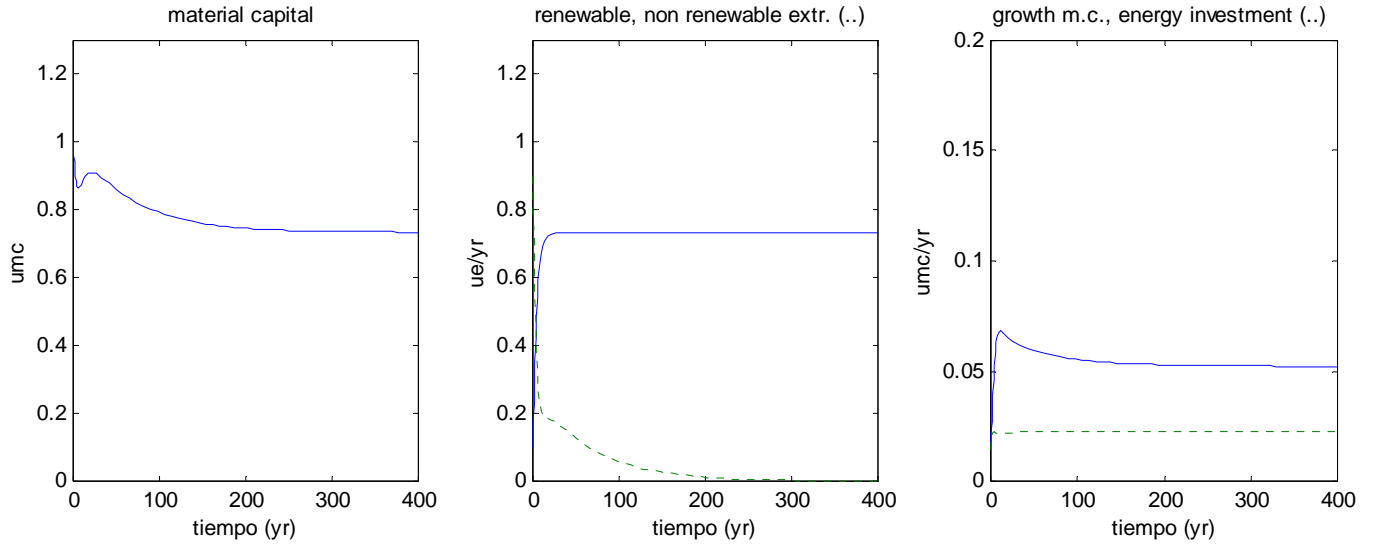


Figura 11

'scarcity factor muy sensible', 'renw lenta', 'meseta'  
renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
non\_renew\_init = 100

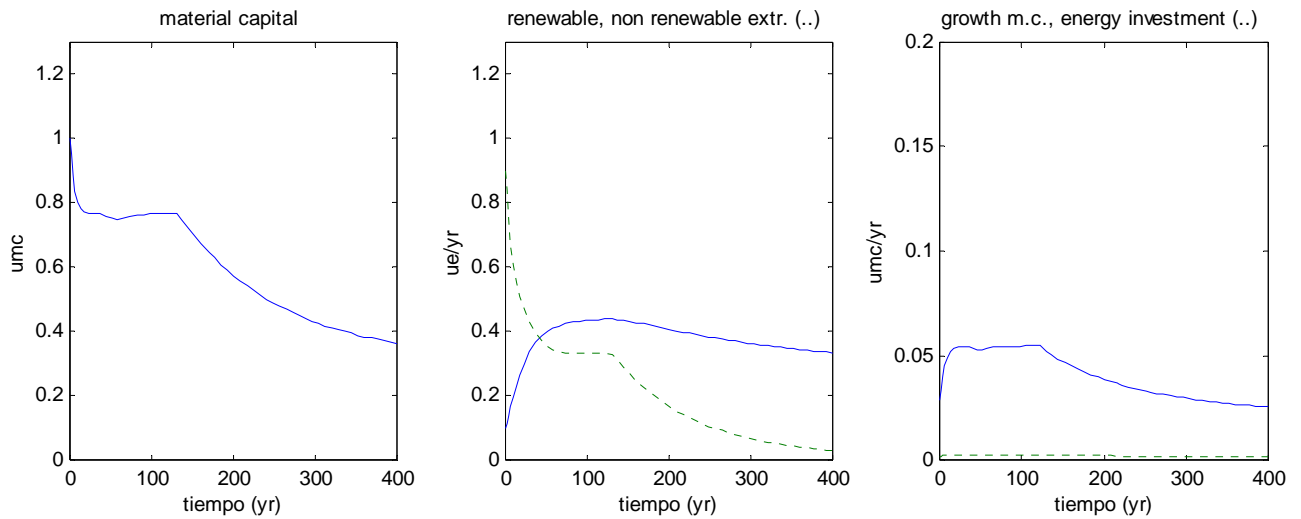


Figura 12

De las 216 simulaciones 108 han sido catástrofes. Las crisis terminan tendiendo a un equilibrio de capital material constante, que puede fijarse en valores muy diversos.

A simple vista parece haber una correlación muy evidente entre el ritmo de implantación de las energías renovables y la evolución. Vamos a observar mejor las correlaciones entre variables para poder afirmarlo.

**Ritmo de implantación de las renovables.** Para estudiar si el ritmo de implantación de las renovables influye en el comportamiento de crisis o de catástrofe se ha hecho un gráfico entre el `renewable_percent` (el segundo valor, que distingue claramente una tabla de otra) y el valor final del capital material. La correlación es evidente. Con renovables lentas se pueden tener escenarios de catástrofe, pero los casos con mayor valor final del capital material se concentran en valores altos de `renewable_percent`.

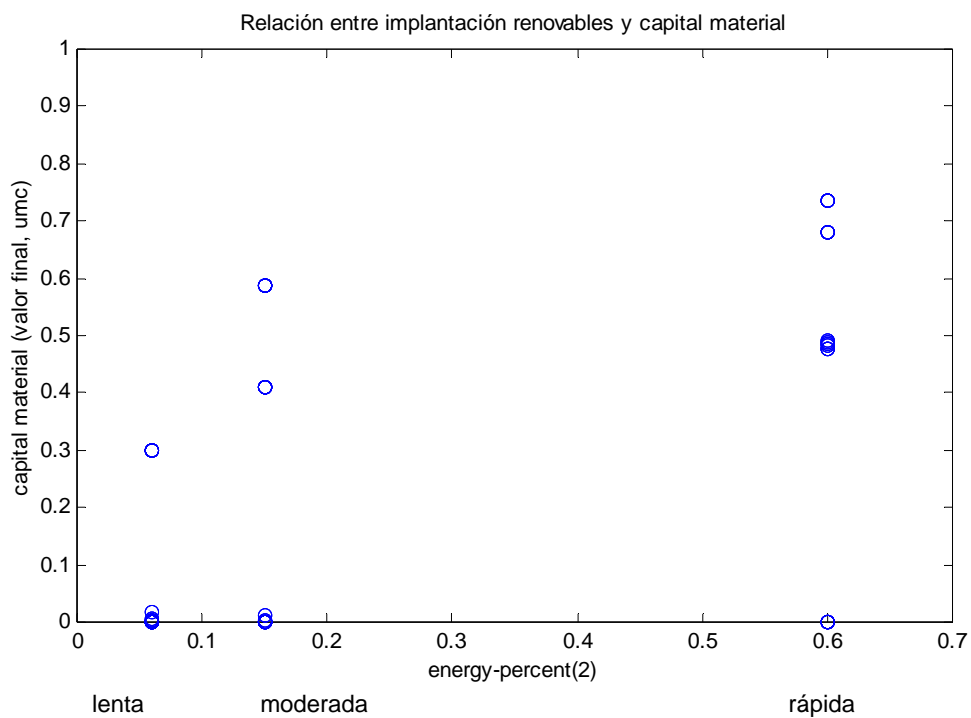


Figura 13

**Coste de implantación de las renovables.** Si `renewable_return` es alto el coste de implantación de las renovables es menor. Esto no parece tener una influencia tan significativa como el parámetro anterior, pero el valor final del capital material aumenta si se incrementa este parámetro. Lo que sí se observa es que si el retorno es menor que 1 (TRE 0.9 en 30 años) sólo se producen catástrofes, mientras que si el retorno es elevado no las hay.

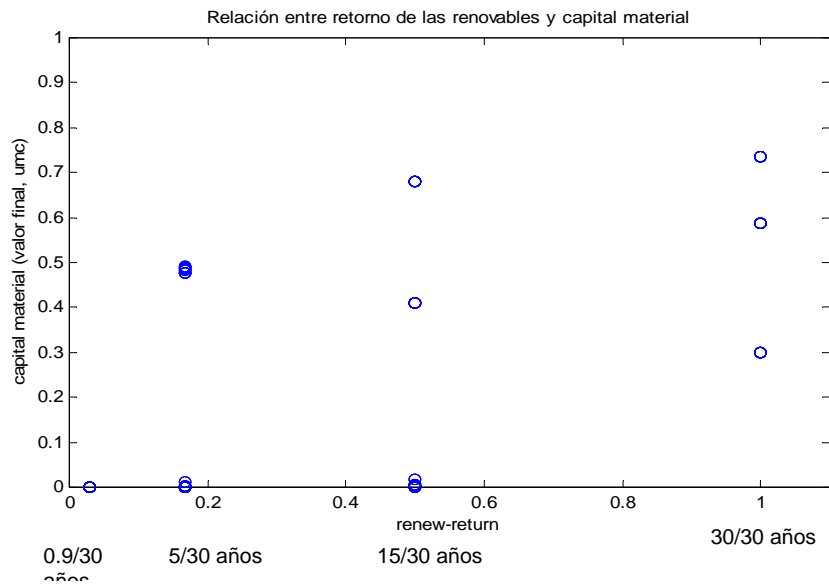


Figura 14

**Reservas de energías no renovables.** Tampoco el hecho de que queden más o menos años de reservas de energías no renovables parece tener mucha influencia a la hora de decidir el valor final del capital material, como se puede ver en la figura.

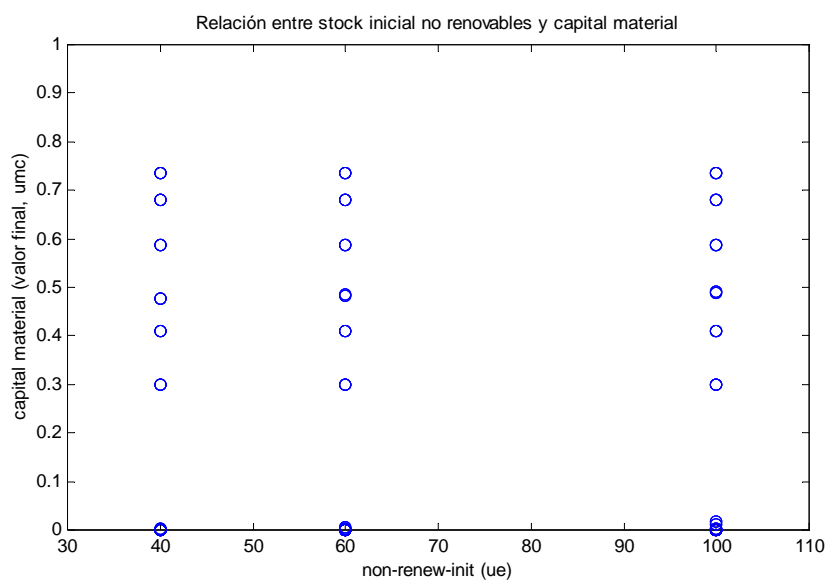


Figura 15



**Sensibilidad del crecimiento ante la escasez.** No se aprecian muchas diferencias entre una economía poco, medianamente o muy sensible a la escasez de energía.

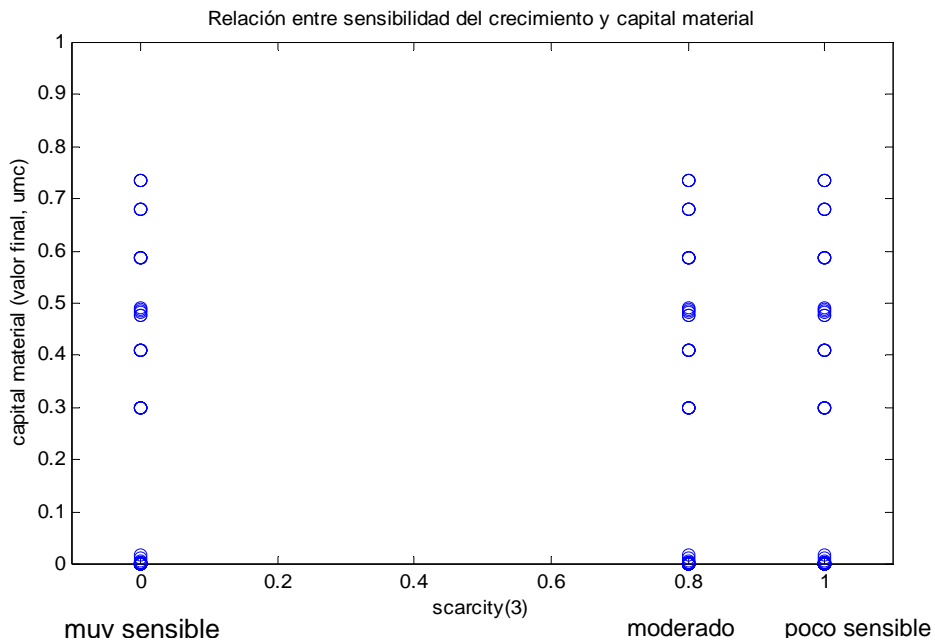


Figura 16

**Límite extracción recursos** (curva de “Hubbert”). Si parece que hay mayor número de simulaciones con valores altos del capital material final con una extracción en forma de “meseta”, pero la correlación no es tan clara como con otras variables.

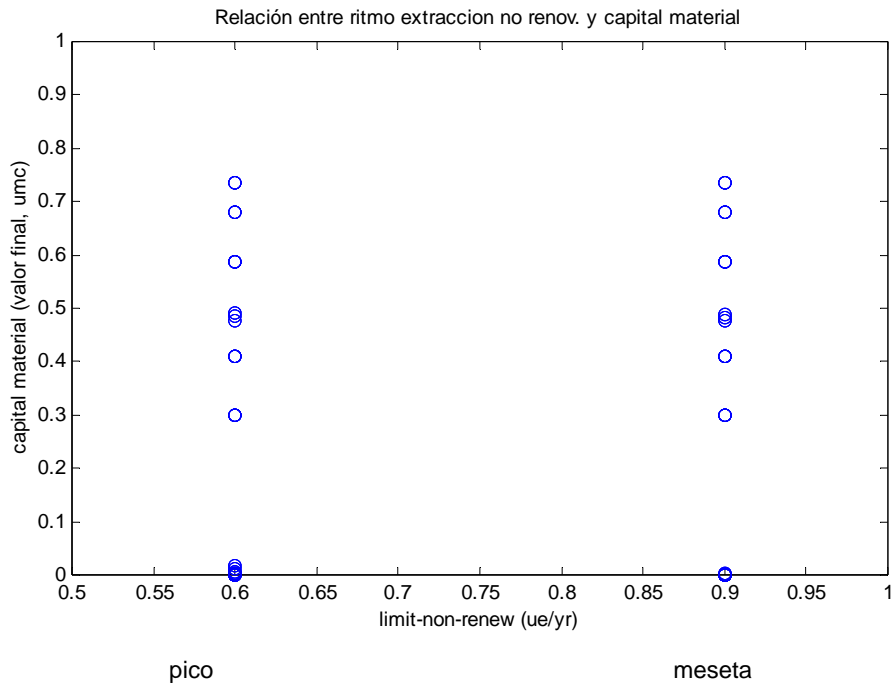


Figura 17

**Relación de varias variables a la vez.** Por los resultados de las figuras anteriores da la impresión de que hay tres factores clave: el ritmo de implantación de las renovables, el retorno energético de éstas y el ritmo de extracción de las no renovables. Vamos a comparar el producto de estas tres variables con el valor final del capital material. En la figura podemos ver que la correlación es buena, parece que estos tres factores son relevantes a la hora de decidir entre un comportamiento de crisis o de catástrofe.

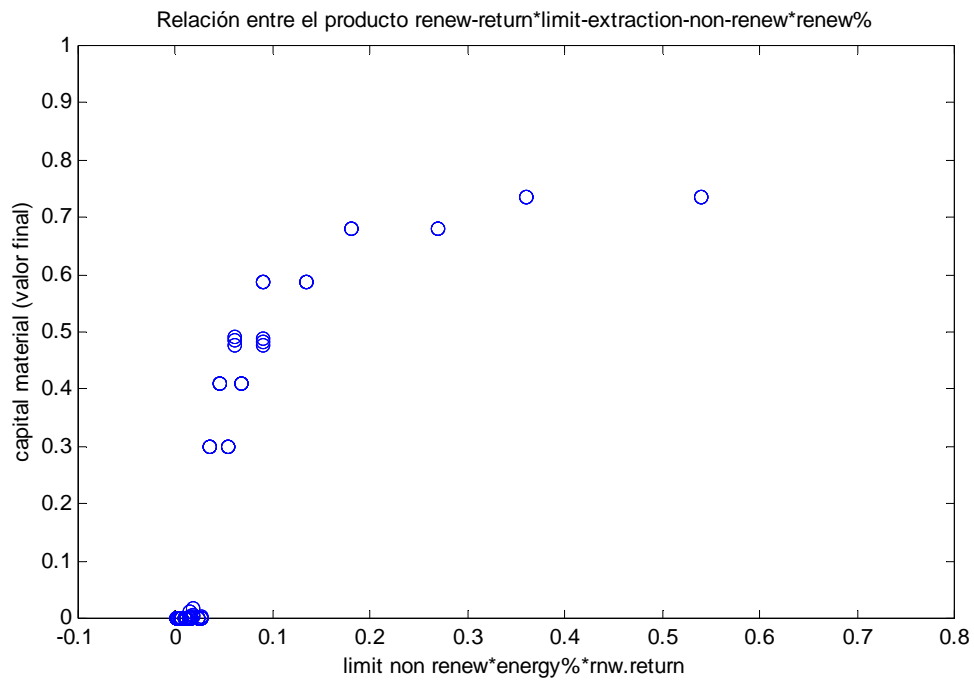


Figura 18

**Límite de energías renovables superior al actual consumo.** Si el límite máximo de las renovables lo situamos en 1.3ue (el inicial es 1ue) tenemos 72 simulaciones de catástrofe únicamente. En este caso también parece que las tres variables del retorno energético de las renovables, el ritmo de implantación de estas y el ritmo de extracción del stock no renovable parecen ser influyentes, como se puede ver en la figura.

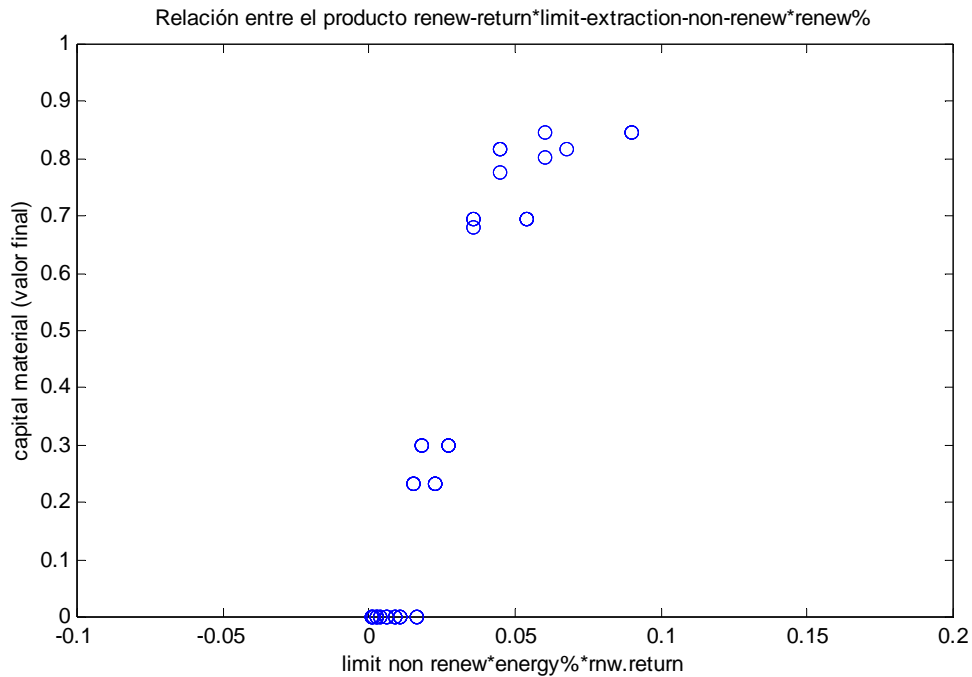


Figura 19

En estos casos el capital material puede llegar al límite que le permiten las renovables o no llegar, y quedarse por debajo del valor inicial, como se puede ver en las figuras.

'scarcity factor poco sensible', 'renw lenta', 'meseta'  
 renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
 non\_renew\_init = 40

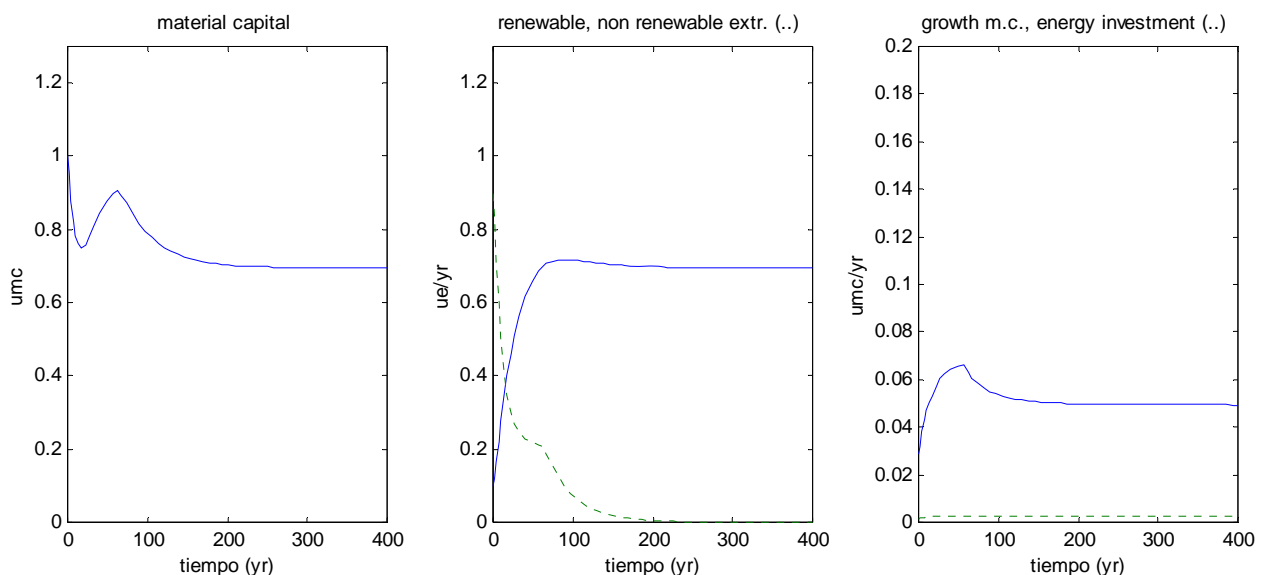


Figura 20

Puede haber, incluso, escenarios en los que prácticamente no hay crisis, porque la inversión en renovables es muy rápida (un 20% del crecimiento cuando se tiene un 30% más de energía de la necesaria “renew rápida”).

'scarcity factor poco sensible', 'renw rápida', 'pico'  
 renew\_return = 1 (TRE=30 /30 años)  
 non\_renew\_init = 100

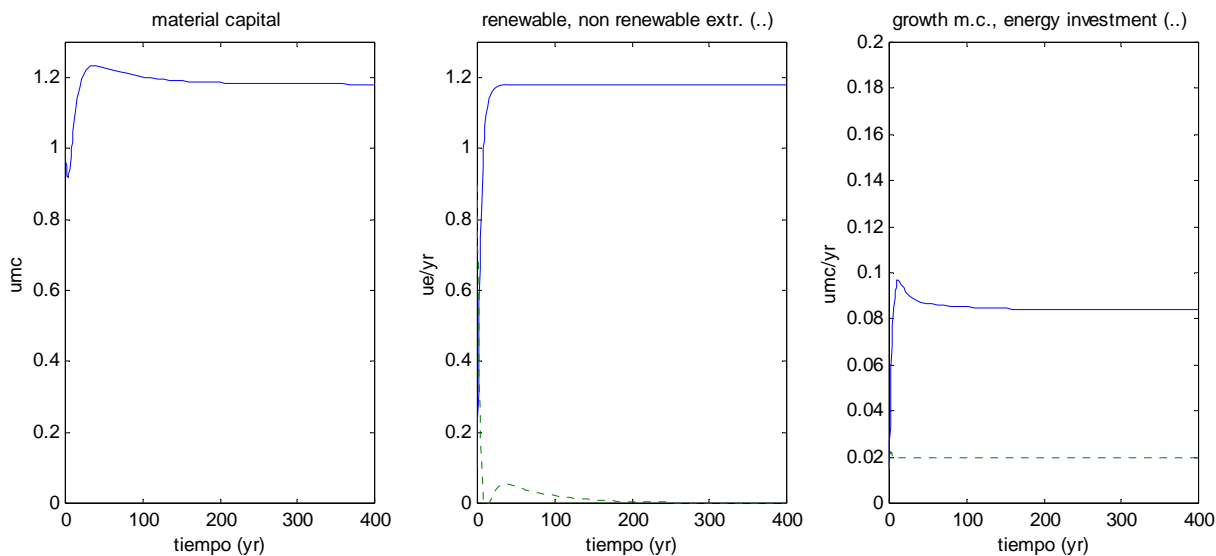


Figura 21

En este caso tenemos un colapso. La implantación de renovables es rápida, pero el retorno energético es menor que uno y al final no se puede evitar la crisis.

'scarcity factor poco sensible', 'renw rápida', 'meseta'  
 renew\_return = 0.03 (TRE=0.9 /30 años)  
 non\_renew\_init = 40

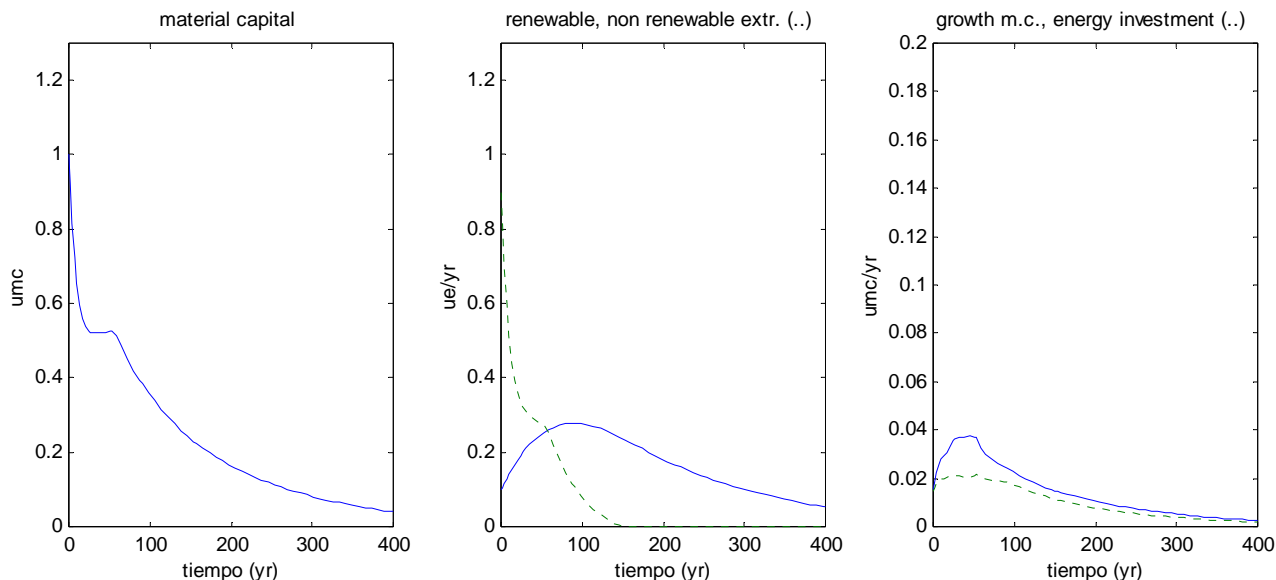


Figura 22

## 5. Conclusiones

Las simulaciones del modelo energificación intentan describir la transición entre una sociedad industrial y con crecimiento exponencial basada en energías no renovables hacia otra basada en energías renovables.

Los datos de las simulaciones son bastante reveladores. Muestran que el sistema puede evolucionar tanto hacia un escenario de civilización industrial sostenible y basado en energías renovables como hacia un escenario de decrecimiento continuo y desmantelamiento de la civilización industrial. Las simulaciones muestran la importancia de los ritmos en el resultado final: el ritmo de implantación de las renovables y el ritmo de extracción de los recursos no renovables son factores clave. También es importante el retorno energético de las tecnologías renovables.

En casi todas las simulaciones se observa un decrecimiento inicial, cuando se empieza a ver el límite de extracción de energía no renovable, que luego puede recuperarse cuando las renovables empiezan a instalarse o no. En algunos escenarios (límite máximo de renovables mayor que el consumo actual e implantación muy rápida) se consigue que la crisis inicial sea muy pequeña, pero hay que tener en cuenta que el parámetro "renew rápida" es una implantación de las energías renovables muy exigente (poco realista en la actualidad).

Esto sólo es un inicio, y no deja de ser un juego, pero puede ayudar a echar luz sobre un problema complejo y acuciante. Quizá con datos más realistas y con dinámicas más realistas este tipo de estudios podría realmente decirnos si tiene futuro una sociedad tecnológica basada en renovables o si es sólo una quimera. En principio los resultados de este modelo sencillo muestran que es posible, pero depende de decisiones estratégicas político-económicas, como las inversiones en renovables, y de factores como el retorno energético o el declive de la energía fósil que no podemos controlar tan fácilmente.

## RESUMEN

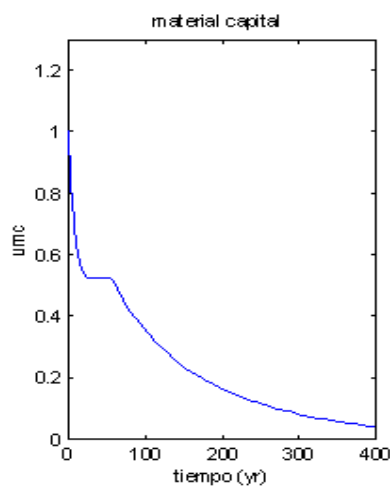
### Simulación energética :¿Es posible la transición de una economía fósil a una renovable?

¿Qué pasa con una sociedad industrial basada en energías no renovables que se va quedando sin ellas? ¿Cómo puede realizarse la transición de un mundo basado en energías no renovables a otro basado en renovables? ¿Es imposible? Hay muchos que opinan que sí, que sin la energía de los combustibles fósiles los aerogeneradores, las redes eléctricas y los paneles solares no se pueden construir y todo se viene abajo.

Enerficción es una simulación por ordenador basada en la herramienta usada por Meadows y col. en sus informes sobre los límites del crecimiento: la dinámica de sistemas. Se han intentado describir los comportamientos elementales de un mundo industrial que tiende a crecer exponencialmente y donde las no renovables declinan y pueden ser sustituidas por energías renovables.

Los resultados muestran claramente dos comportamientos básicos: crisis y catástrofe. El capital material (es decir, el número máquinas y objetos de todo tipo que requieren energía para funcionar y ser construidos) puede disminuir inicialmente cuando las energías no renovables tienden a escasear, pero luego recuperarse cuando las renovables se van implantando y llegar a un estado estacionario. Esto es lo que se ha llamado una *crisis*. O bien puede no hacerlo. Es posible que, al empezar a disminuir el capital material empecemos a no tener máquinas con las que construir otras máquinas y tampoco lleguemos a implantar una sociedad basada en energías renovables. Es lo que se llama un comportamiento de *catástrofe*. Los factores que determinan si se alcanza uno u otro tienen que ver con los diferentes ritmos y parámetros del sistema.

**Catástrofe**



**Crisis**

