

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

***Pablo Álvarez Watkins***

*Ingeniero Mecánico por la Universidad Nacional Autónoma de México*

***Juan José Sánchez Inarejos***

*Doctor Ingeniero Industrial. Profesor de la Universidad Politécnica de Madrid*

La conquista que el hombre ha hecho de algunas de las formas de energía que existen en la Naturaleza ha sido uno de los hitos más importantes del desarrollo humano (el fuego, la pólvora, la gasolina, la electricidad, la energía atómica, etc.). Nuestra forma de vida actual es imposible sin un apropiado e importante aporte energético. De modo que, preservar la forma de vida actual en los años y siglos futuros y dar la posibilidad a nuestros hijos y nietos de que inventen nuevas formas de vivir, lleva aparejado una servidumbre evidente: es necesario disponer de energía suficiente para ello. La disciplina encargada de organizar dicho consumo será la planificación energética orientada al desarrollo sostenible.

### HISTORIA DE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

La planificación energética (estudiar metódicamente de dónde se van a sacar los recursos energéticos que utilizaremos en el futuro) es una actividad muy reciente que comenzó a generalizarse entre los países más desarrollados a raíz de la crisis energética de la década de 1970 a 1980. Desde entonces, se han desarrollado muchos modelos entre los cuales destacan: MARKAL<sup>1</sup>, NEMS<sup>2</sup>, SAGE, POLES<sup>3</sup>, 11R y SG<sup>4</sup>. Aunque las diferencias entre ellos son varias, las coincidencias conceptuales y estructurales son muy notables.

Por ejemplo, el MARKAL que es muy utilizado actualmente y ha servido de referencia para otros modelos, trata de averiguar la oferta y demanda energética de una región. Parte de un escenario (caso) de referencia con la demanda futura estimada utilizando las tendencias históricas. Sobre ese caso de referencia se van planeando otros casos alternativos al introducir sobre él los cambios tecnológicos, financieros o regulatorios que se estiman previsibles. Eligiendo las opciones que mejor minimizan los costos.

En términos generales MARKAL sigue cuatro pasos para su construcción: El primero paso es definir un Sistema Energético de Referencia (Reference Energy System, RES), que represente el sistema energético completo de la región o nación, desde la extracción de recursos, transformación, distribución y consumo. La definición de este sistema es la base del modelo, y en él se representan

---

<sup>1</sup> MARKAL (*MARKet Allocation model*, Modelo de Asignación de Mercado) desarrollado a petición de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) por la Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP, Programa de Análisis de Sistemas de Tecnología Energética).

<sup>2</sup> El NEMS (National Energy Modeling System, Sistema de Modelado de Energía Nacional) y el SAGE (System for the Analysis of Global Energy Markets, Sistema de Análisis del mercado Global de la Energía), desarrollado por La Administración de la Información de la Energía (EIA, Energy Information Administration), que depende del Departamento de Energía de los EE.UU. (DOE, Department of Energy).

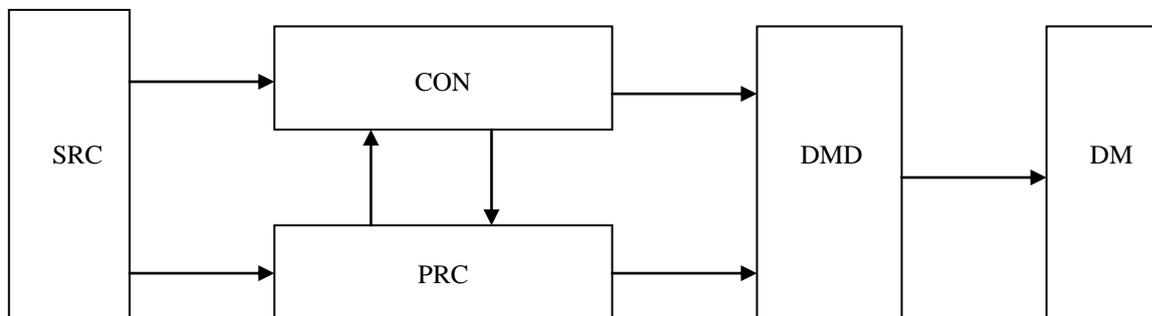
<sup>3</sup> POLES (Prospective Outlook on Long Term Energy Strategy, Visión Prospectiva para la Estrategia Energética de Largo plazo) desarrollado por la Comisión Europea dentro de los programas JOULE II y III.

<sup>4</sup> El 11R (11 Regions, 11 regiones) y el SG (Scenario Generator, Generador de Escenarios) son submodelos que conforman el modelo de proyección que utilizan el WEC (World Energy Council, Consejo Mundial de la Energía) y el IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados).

todas las tecnologías disponibles y todas las relaciones entre oferta y demanda. Esquemáticamente se puede representar el sistema de la siguiente manera:

Figura 1

Esquema general del Sistema Energético de Referencia, RES



El módulo SRC (Sources, recursos energéticos) se encargaría de representar todas aquellas tecnologías vinculadas con las fuentes de energía. El módulo CON (Conversión, transformación) representa las tecnologías de conversión o transformación de energía hacia electricidad o vapor para calefacción. El módulo PRC (Process, procesos) representa la transformación de recursos primarios como el petróleo crudo, en energéticos secundarios como sus productos refinados. El módulo DMD (Demand Device, Dispositivos de demanda) representa las tecnologías y las estructuras que sirven para la transmisión y distribución de la energía, y por último DM (Demand, Demanda) representa la demanda de energía, simulando las tecnologías que consumen energía.

El segundo paso de la estructura del MARKAL sería definir las condiciones actuales del sistema, su capacidad de expansión y los posibles cambios de tecnología, que podrían darse en el período a analizar. El tercer paso es definir los escenarios posibles, a partir de lo que se conoce como un árbol de eventos, que define para cada periodo de tiempo las perspectivas de evolución del sistema, que suelen ser sólo dos opciones por periodo de tiempo. El cuarto y último paso consistiría en elegir el mejor escenario posible. Esto se hace a partir de técnicas de optimización, que buscan los equilibrios parciales entre la oferta y la demanda, y se elige aquel que minimiza el costo de la opción.

## CRÍTICAS A LOS MODELOS DE PLANIFICACIÓN ACTUALES

En general, los modelos de planificación energética actuales son sólidos y excelentes sistemas de planificación, a los que no es fácil hacer críticas superficiales, dado que el alto grado de sofisticación de los mismos impide que personas ajenas a ellos tengan la capacidad de detectar errores en los mismos. Sin embargo, lo que sí admiten es críticas radicales como:

- Ninguno de los modelos actuales plantea, directamente, satisfacer las necesidades de la población, sino que esa respuesta se hace, indirectamente, mediante consideraciones económicas (no plantea en esencia las necesidades de la población, sino del sistema económico).
- No se considera el posible agotamiento de los recursos (sí su encarecimiento).
- No se tiene en cuenta como parte del sistema los efectos secundarios sobre el medio ambiente (contaminación, cambio climático, etc.).

Qué duda cabe que el mejor método de planificación sería aquél que fuese capaz de estimar directa y completamente cuáles son las necesidades reales de la población y satisfacerlas; pero, por ahora, ese método directo hemos de descartarlo; saber cuáles son las *verdaderas* necesidades energéticas del ser humano, actual y venidero, es imposible. Pues las necesidades son cosas

cambiantes, subjetivas, inconscientes y, muchas veces, incontrolables. De modo que la primera crítica a los modelos actuales también será aplicable a los modelos futuros.

Ahora bien, los modelos de planificación actual cortan por lo sano y a la pregunta de qué energía necesitaremos en el futuro responden con un tajante: “aquella que podamos comprar y vender”. Y en verdad que no es ésta mala respuesta, más aún, es lo mejor que hemos sido capaces de inventar. Pero sospechamos que para el futuro, respuestas tan simples no serán suficientes. De hecho, los graves problemas ambientales y sociales que se atisban en el horizonte así nos lo están empezando a “exigir”.

Por otro lado, nuestro desarrollo intelectual, sin ser exagerado, nos empieza a permitir planificar el futuro con más precisión que hasta ahora. Pues, de forma esquemática, hasta ahora lo que venimos haciendo para estimar cuánta energía consumiremos mañana es simplemente suponer que mañana nuestro PIB aumentará, por ejemplo, un 5%. Pero esa estimación sería más exacta (y quizás hasta más “justa”) si además de considerar lo que queremos (o imaginamos) que crecerá el PIB tuviésemos en cuenta cosas como estas:

- Que la vida media de la población aumenta el 5%.
- Que nuestros hijos saben el 5% más de lo que nosotros sabemos.
- Que no se agoten las reservas energéticas.
- Que las condiciones ambientales no se degradan.

Hasta ahora, con que el PIB creciese dábamos por hecho que todo lo demás (educación, calidad de vida y condiciones ambientales) vendría por añadidura, pero no es ésa una regla “exacta”. La brújula que ha guiado al mundo desarrollado para traernos hasta la situación en donde nos encontramos ha sido la economía; vivir más, saber más o preservar las especies animales no eran objetivos conscientes, pero sí fueron consecuencias innegables. Pero hoy, ya estamos en condiciones de dar un paso más.

Éste es pues el objetivo de este trabajo, dar un paso más en los modelos de planificación energética y plantear quizás la semilla de una nueva generación de modelos que incluyan, además de las consideraciones económicas, otras de índole ambiental, cultural y social. Es decir, modelos de planificación energética orientados al desarrollo sostenible.

## **ESTRUCTURA DEL MUNDO DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL DESARROLLO HUMANO**

Desde 1990 el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) elabora el llamado Índice de Desarrollo Humano (IDH), índice adimensional (de 0 a 1) que pondera a partes iguales la renta per cápita, el nivel educativo y la esperanza de vida de los habitantes de un país. Utilizando este índice se puede conocer con *mayor precisión* el desarrollo real de los países del mundo que si sólo se utiliza la renta per cápita como índice de comparación.

Si el objetivo es planificar la energía que necesitaremos en el futuro un poco mejor de lo que lo venimos haciendo hasta ahora, parece natural que en vez de usar el PIB como medio esencial de planificación, utilicemos un índice mejorado como es el IDH. Es por esto que el estudio que ahora se presenta comienza clasificando al mundo utilizando el IDH y la tasa de crecimiento. Nuestra meta será la de conducir a un número concreto de habitantes del planeta desde unas posiciones de IDH retrasadas hasta otras posiciones más elevadas.

Analizando 50 países “seleccionados” con arreglo a los criterios de alto o bajo desarrollo humano (IDH mayor o menor de 0.85) y diferentes tasas de crecimiento poblacional esperado en 50

años (>200%, entre 110% y 200%, entre 90% y 110%, y, <90%), se obtiene un mundo dividido en siete grupos de la forma siguiente:

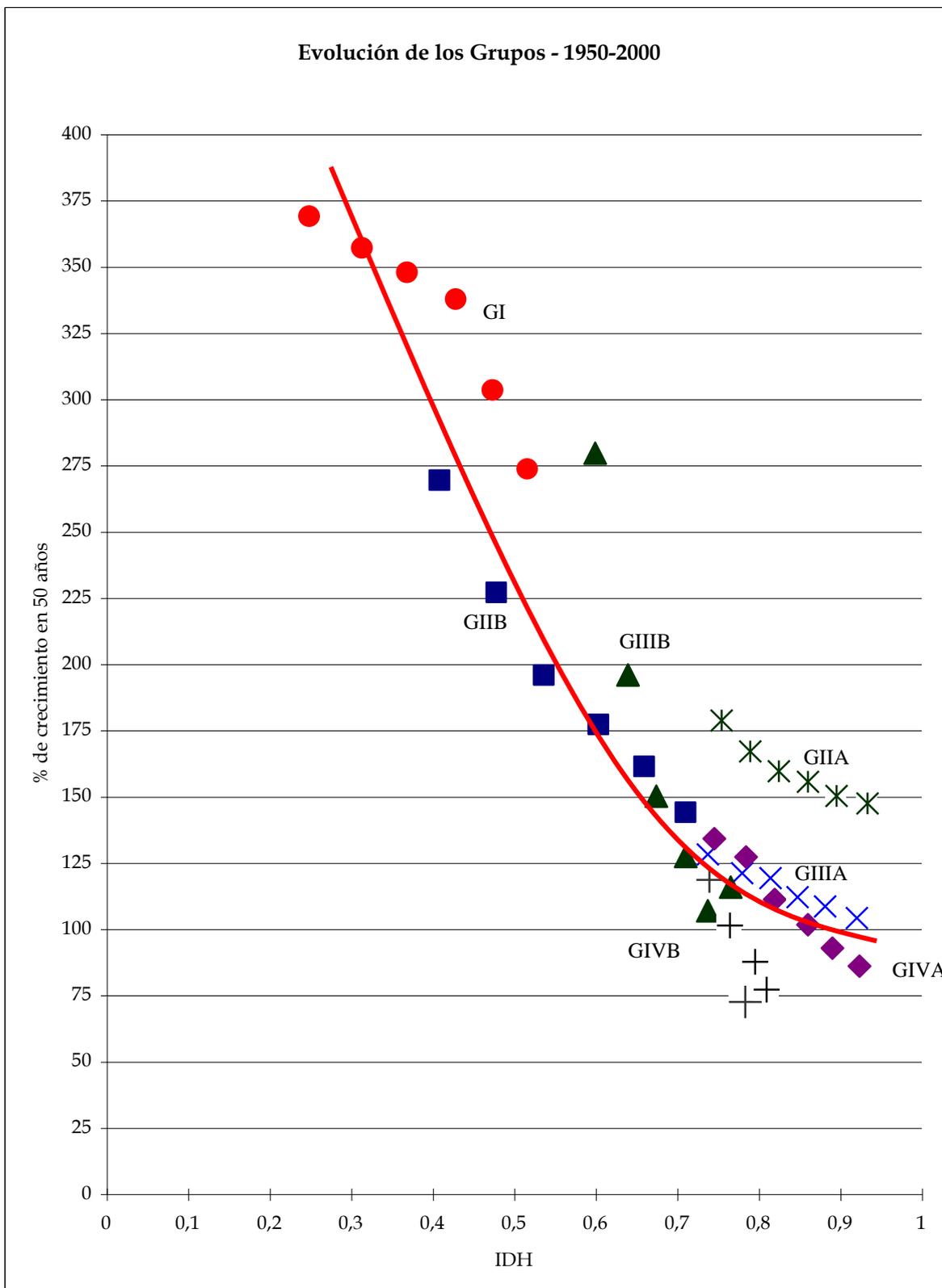
Tabla 1  
Grupos de países y sus integrantes. (El ordinal de los grupos: I, II, III y IV indica, en ese orden, tasas de crecimiento poblacional. El subgrupo A o B indica alto o bajo desarrollo humano.)

<i>La población crece explosivamente</i>	<i>La población crece moderadamente</i>		<i>Población constante</i>		<i>Pérdida de población</i>	
<i>Los Olvidados</i>	<i>Los Deslumbrados</i>	<i>Los Derrochadores</i>	<i>Los Insumisos</i>	<i>Los Vacilantes</i>	<i>Los descalabrados</i>	<i>Los Reconstruidos</i>
<i>GI</i> IDH<0.85 P2050/P2000 > 200%	<i>GIIB</i> IDH<0.85 110< P <200%	<i>GIIA</i> IDH>0.85 110< P <200%	<i>GIIB</i> IDH<0.85 90< P <110%	<i>GIIA</i> IDH>0.85 90< P <110%	<i>GIVB</i> IDH<0.85 P2050/2000 < 90%	<i>GIVA</i> IDH>0.85 P2050/2000 < 90%
Angola Arabia Saudita Etiopía Nigeria Pakistán Perú Rep. Dem. Congo	Argelia Argentina Brasil China Chile Egipto Filipinas India Indonesia Irán Kenia Marruecos México Tailandia Turquía Venezuela Vietnam	Australia Canadá EE.UU. Irlanda Luxemburgo	Cuba Sudáfrica	Austria Bélgica Dinamarca España Finlandia Francia Grecia Holanda Portugal Reino Unido Suecia	Estonia Federación Rusa Polonia Rumania Ucrania	Alemania Italia Japón

Si se hace un seguimiento de estos grupos de países a lo largo de los últimos 50 años se obtiene una gráfica en la que se observa una clara tendencia en el desarrollo del último medio siglo.

Figura 2

Mapa IDH-Crecimiento poblacional. Tendencia en la evolución de los distintos grupos estudiados (Círculo = GI, cuadrado = GIIB, triángulo = GIIIB, Cruz = GIVB, Asterisco = GIIA, Equis = GIIIA y rombo = GIVA). Todos los grupos evolucionan desde 1950 a 2000 de 5 en 5 años, siendo el punto correspondiente a la posición del grupo en 1950, el punto inicial, el que se encuentra más a la izquierda de la gráfica, y el último punto hacia la derecha de la gráfica el que correspondería al año 2000.



La información que aporta esta gráfica es espectacular pues se aprecia en ella cómo cada grupo con el paso del tiempo trata de disminuir su crecimiento poblacional a medida que aumenta su IDH. Lo cual, confirma empíricamente, el hecho intuitivo de que el desarrollo de la Humanidad se realiza de forma progresiva y que los intentos de escapar a ese desarrollo gradual dando grandes saltos (como fue el caso de los países del grupo de “los descalabrados”) están condenados al fracaso.

## **DESARROLLO HUMANO Y CONSUMO DE ENERGÍA**

Actualmente se asume fácilmente que existe una relación entre crecimiento económico y el consumo de energía. Esa relación se establece con la ‘intensidad energética’, pero, ¿se puede establecer una relación entre desarrollo humano y consumo energético? Sí, aunque está claro que dicha correspondencia no es lineal. Es evidente, que dependiendo del grado de desarrollo alcanzado, tanto el origen (es decir la fuente), como el uso, la cantidad y la calidad, irán cambiando. Dentro de todas las variables que existen en el desarrollo humano, la primera relación (bidireccional) que define el consumo energético total esta establecida con la población total:

$$\text{Consumo de energía} = f(\text{Población})$$

Por otro lado, además del número total de personas que pueblan un país, es muy importante para determinar el consumo energético, saber qué tipo de sociedad forman. No es lo mismo un mundo subdesarrollado donde sus habitantes utilizan la energía para cocinar y calentarse, que otro en el que el uso principal es el transporte por carretera en automóviles. Es evidente que una sociedad muy avanzada, donde hay un gran número de personas muy cultas y longevas que se divierten leyendo libros y paseando en bicicleta, debe tener una estructura energética muy diferente de otra sociedad donde la diversión mayoritaria consiste en desplazarse a gran velocidad en vehículos individuales por las autovías los fines de semana.

De modo que la ecuación anterior habría que interpretarla de forma vectorial, utilizando para describir a la población más cosas que sólo el número total de personas; y respecto del consumo, más cosas que el número total de Jules consumidos:

$$\text{Consumo de energía (cantidad, cesta)} = f(\text{Población, longevidad, escolaridad, sectores de consumo, medio, clima, historia, valores, tipo de mercado económico, tipo de sistema político, etc.})$$

Naturalmente, esta relación nos es desconocida, de hecho, no existe una relación fija, única y constante, sino que es algo cambiante y muchas veces impredecible. Ahora bien, de esa relación sí se saben puntos concretos que ya han ocurrido. Así por ejemplo, tenemos datos bastante fiables que nos permiten saber cuánta energía y de qué clase utilizaron los Estados Unidos, Etiopía, China, España, Sudáfrica, México o Alemania para recorrer una zona del mapa IDH/Población entre 1950 y 2000.

¿Podremos utilizar estos datos energéticos matizados para pronosticar cuánta energía consumiremos entre 2000 y 2050? Si lo lográsemos, nuestras estimaciones serían mucho mejores que las que actualmente tenemos, dado que además de hacer intervenir en nuestros planeamientos aspectos económicos y poblacionales, utilizaríamos dos nuevos parámetros que hasta ahora no se han utilizado: la calidad de vida y la cultura (medidos en el IDH por la esperanza de vida y la educación).

## **ESENCIA DEL NUEVO MÉTODO DE PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA**

Lo que tenemos claro es que en el futuro todos los pueblos de la Tierra aspirarán a hacer lo mismo: tratar de avanzar en el desarrollo humano. Los que estén a la cabeza de los índices de desarrollo tendrán que inventar nuevos caminos, mientras que aquellos que estén en posiciones más rezagadas imitarán a los de cabeza. Esto es absolutamente claro y evidente, pero además comprobable; pues es justo lo que hemos hecho hasta ahora. No cabe ninguna duda que los pueblos subdesarrollados

para salir de su miseria imitarán los comportamientos de aquellos pueblos que ya han salido de ella, y que estos últimos si alguna vez ayudan a los subdesarrollados lo harán de la única forma que saben, esto es, imponiendo sus exitosos modelos de desarrollo.

Sabemos cuánta energía se ha consumido en el mundo entre 1950 y 2000, quién la ha consumido y de qué clases era y en qué se ha invertido. También sabemos que se ha llevado a un determinado número de personas (todos los habitantes del planeta en ese tiempo) desde unos puntos de IDH hasta otros. Tenemos esos datos anotados de 5 en 5 años, sabemos tanto los datos iniciales como los intermedios y los finales. ¿Este conocimiento nos puede ayudar a saber cuánta energía, y de qué tipo, necesitaremos para llevar a una determinada cantidad de personas desde el IDH de hoy (2000) hasta otro IDH mayor en 2050?

La respuesta a esta pregunta sería positiva si dispusiésemos de un método de cálculo que nos permitiese averiguar cuál fue la energía que consumió el mundo partiendo de sólo los datos de IDH en 1950 y en 2000, y el resultado de ese cálculo coincidiese con lo que hemos consumido realmente.

Para descubrir cómo elaborar ese modelo hagamos un pequeño juego. Tomemos a un solo grupo de los siete en que hemos dividido el mundo, este grupo parte de 1950 con una cantidad de gente, un consumo energético determinado y una estructura de ese consumo concreta. En el transcurso de los 50 años considerados el grupo se traslada a otro punto del mapa IDH/Crecimiento y al mismo tiempo que se va moviendo por el mapa va cambiando su estructura de consumo energético tanto en las fuentes que va utilizando como en los usos a los que se destina. El camino es pues fijo y conocido: será lo que indique el gráfico de la figura 2.

Calcular la energía que el grupo consume en ese tiempo, las centrales que necesita construir, los contaminantes que emitirá y lo que pagará por todo ello es muy sencillo, sólo hay que ir sumando de 5 en 5 años (se podría hacer de año en año pero con la lentitud que cambian las estructuras energéticas un lustro es un periodo de tiempo suficientemente pequeño), lo que la estructura del consumo de cada periodo nos da.

Los datos que necesitamos para hacer el cálculo son conocidos (son datos históricos) pero si sólo conociésemos el primer dato y el último (el de 1950 y el 2000), los intermedios los podríamos conocer sin más que interpolarlos con arreglo a la curva de la figura 2. Al hacerlo, nos saldrían prácticamente los mismos datos históricos y los resultados en cuanto a consumo energético total coincidirían con los datos históricos.

Si repetimos el proceso para cada grupo y sumamos todos los consumos, todas las emisiones y todos los costos, los resultados nos dirían con casi total exactitud cuánta energía se ha consumido, de qué tipo ha sido, cuántas emisiones de contaminantes hemos hecho y cuánto nos ha costado todo el tránsito. Todos estos resultados deberían coincidir con los datos históricos si el método de cálculo es suficientemente robusto.

Pues bien, esto es precisamente lo que se ha hecho en este trabajo y los resultados obtenidos en la comparación de datos históricos y aquellos que el modelo obtiene únicamente considerando los extremos temporales del análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2

Comparación de algunos de los resultados de la corroboración histórica (1950-2000) del modelo. Datos históricos C0, modelo sólo considerando los extremos C0b.

	<i>C0- 1950</i>	<i>C0 – 2000</i>	<i>C0b - 1950</i>	<i>C0b - 2000</i>
Población (P) global	2528.76	6080.09	2528.76	6080.14
Consumo energético (CE) global	150.57	419.19	150.57	419.20
Emisión CO <sub>2</sub> X10 <sup>10</sup> kg	1395.54	3308.18	1395.54	3308.20
<b>CE Global (de 1950 a 2000)</b>	<b>% Global C0</b>	<b>% Global C0b</b>	<b>CE Global C0 X10<sup>18</sup> J</b>	<b>CE Global C0b X10<sup>18</sup> J</b>
Petróleo	28.4	27.74	3954.07	3865.94
Carbón	29.23	31.08	4070.22	4331.26
Gas Natural	15.3	15.52	2130.13	2162.33
Nuclear	3.01	3.08	419.06	429.31
Gran Hidráulica	4.81	4.51	669.64	628.47
Otros	1.25	18.07	2680.3	2518.68

Como se puede observar entre los resultados obtenidos del modelo alimentado con datos históricos por cada lustro (caso C0), son prácticamente los mismos que el modelo obtiene al considerar como datos únicamente los extremos temporales (caso C0b), es decir, que a pesar de los avatares sufridos puntualmente por la población de un grupo de países durante los 50 años, en realidad la humanidad está tan interrelacionada que se comporta como si fuese un único ente.

Al comparar los resultados del modelo con datos internacionales externos también se encuentra que las mayores divergencias rondan tan sólo el 10% de tolerancia general. Para citar tan sólo un ejemplo de esto, tenemos el cálculo de emisión de CO<sub>2</sub>. El modelo propuesto calcula la cantidad (en kg) de CO<sub>2</sub> vertidos a la atmósfera para cada combustible considerado: petróleo y derivados, carbón, gas natural y biomasa tradicional, de acuerdo a su uso como energético primario y a distintos grados de emisión, que se consideraron constantes para cada combustible, independientemente de la tecnología que llevase a cabo la combustión.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC<sup>5</sup> por sus siglas en inglés) estima que en 1990 se vertieron al ambiente: 1949.2x10<sup>10</sup> kg CO<sub>2</sub>/año, y el WEC<sup>6</sup> considera para el mismo año 2178 x10<sup>10</sup> kg CO<sub>2</sub>/año. El caso C0 proyecta 2905.53x10<sup>10</sup> kg CO<sub>2</sub>/año, que es 956.33 x 10<sup>10</sup> kg (32.91%) más que UNFCCC, y 726.62 x 10<sup>10</sup> kg (25%) más que el WEC. La principal razón de la discrepancia es que el proceso de cálculo utilizado para obtener estos resultados considera la aportación de la biomasa tradicional a la atmósfera de forma neta, sin importar que después se absorba o no, ya que en nuestra opinión ése es ya un problema de los modelos de comportamiento atmosférico y no de aquellos modelos destinados a evaluar escenarios energéticos. El modelo calcula que la aportación global de la biomasa tradicional a la emisión de bióxido de carbono es cercana al 20%, por lo que si descontamos dicho porcentaje y reevaluamos las diferencias con los datos publicados en los informes internacionales, las discrepancias se reducen a: 16.5% con el UNFCCC y 6.7% con el WEC, para el año 1990.

<sup>5</sup> Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change): [unfccc.int/index.html](http://unfccc.int/index.html)

<sup>6</sup> WEC. Energy for Tomorrows world,1993.

Tabla 3

Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre el caso C0 y distintos organismos internacionales

Año /x 10 <sup>10</sup> kg	UNFCCC	WEC	Caso C0
1990	1949	2178	2906
2000	2320	-	3308

Con todo lo anterior, se concluye que el modelo energético desarrollado para la elaboración de perspectivas energéticas responde dentro de los límites de lo razonable y por tanto es apto para la elaboración de nuevas elucubraciones energéticas futuras con un rango de confianza aceptable. Con esto, la sencilla herramienta de cálculo propuesta queda elevada a la categoría de modelo, dado que nos permite estimar qué efectos tiene sobre algunos parámetros esenciales del desarrollo sostenible una determinada configuración del aprovisionamiento energético.

### DE 2000 A 2050.

Si lo que queremos es llevar a la población de hoy en las condiciones que nos encontramos en cuanto a IDH y consumo energético, hasta el año 2050 con otro IDH y otra configuración del sistema energético, y evaluar las consecuencias de realizar ese tránsito, ya podemos hacerlo: disponemos de un modelo que nos permite hacer esa transición con grado de aproximación y fiabilidad razonables. El procedimiento consistiría en los siguientes pasos:

1. Siguiendo las posibles evoluciones en el mapa IDH-crecimiento poblacional, se establece para cada grupo un escenario energético probable en el futuro.
2. Se calcula el consumo energético de cada grupo.
3. Lo consumido se detrae de las reservas para verificar si se agota algún recurso.
4. Se determinan las consecuencias de la transición: Población, Contaminación, Cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>) y Coste.

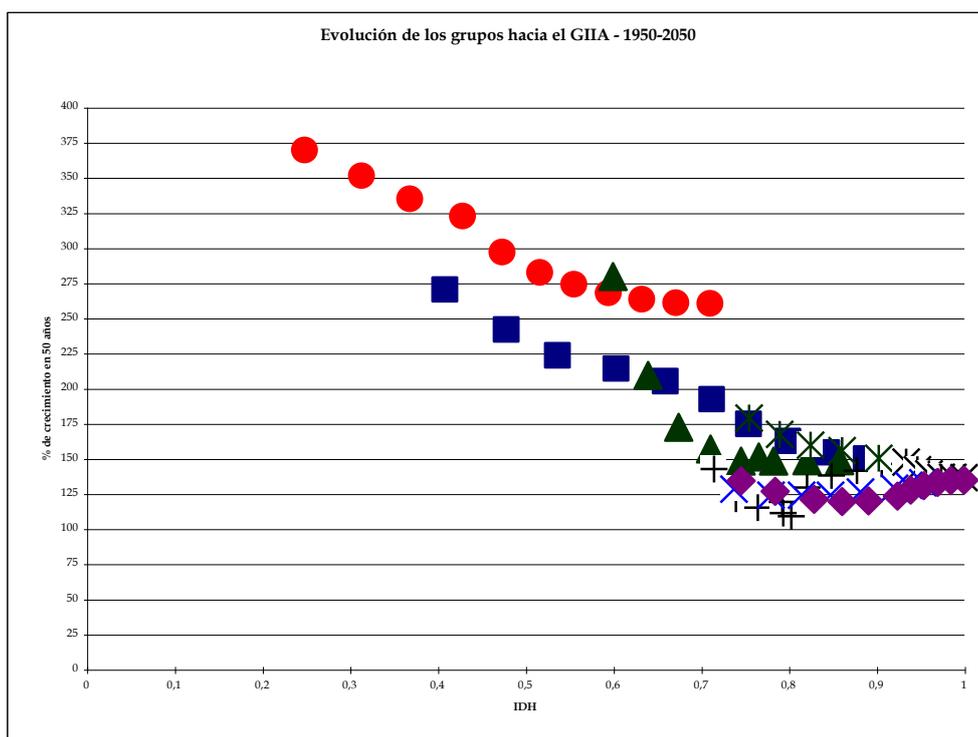
Ahora lo que resta es probar caminos posibles. Del inmenso número de posibilidades se presentan aquí sólo seis. Los tres primeros tratan de averiguar qué pasaría si siguiésemos los modelos energéticos y de desarrollo de los tres grupos punteros (Estados Unidos-Canadá-Australia-Luxemburgo-Irlanda [el GIIA], Europa en general [el GIIIA] o Alemania-Japón-Italia [el GIVA]). Y los tres siguientes se determinan a partir del mejor caso anterior, introduciendo en los tres grupos con alto desarrollo humano cambios encaminados a mitigar los efectos adversos que se evalúan en los primeros tres casos.

### SIGUIENDO A LOS DERROCHADORES – EL GIIA

Si todos seguimos al grupo de los derrochadores (Australia, Canadá, Estados Unidos, Irlanda y Luxemburgo), grupo que había alcanzado en el año 2000 un IDH = 0.934, siendo éste el más alto de todos los grupos, con un crecimiento demográfico en 50 años que se sitúa en el 148% respecto del año 2000, sin indicadores de freno, y un consumo energético per cápita de 393 GJ/hab; todos los grupos imitarían su comportamiento, histórico y actual, y esta actitud se vería representada en el mapa IDH-Crecimiento de la siguiente manera:

Figura 3

Mapa IDH-Crecimiento poblacional. La evolución siguiendo al grupo de los derrochadores.



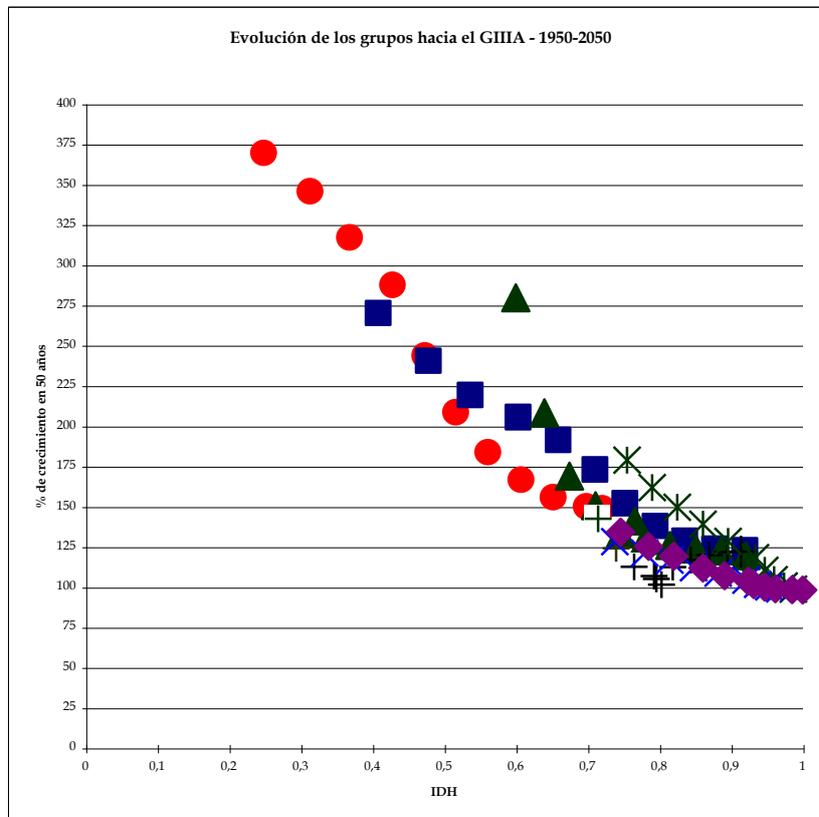
Conociendo este movimiento, Fácilmente sabemos qué población habrá en el mundo en el año 2050, dado que el mapa nos da las tasas de crecimiento poblacional de cada grupo. Así como un IDH promedio, que debe acompañarse de un correspondiente consumo energético y un modelo energético marcado por el que actualmente ostenta el grupo GIIA. Como no se pueden hacer cambios bruscos en sus estructuras sociales y productivas, sino cambios suaves y graduales, las nuevas estructuras de consumo que vayan teniendo serán precisamente las estructuras que los grupos que antes de ellos pasaron por los mismos puntos del mapa IDH-crecimiento.

Operando de esta forma es posible conocer que, si seguimos a los derrochadores, en el 2050:

1. Seremos 10.130 millones de personas, y aumentando casi un 1% anualmente.
2. Nuestro consumo energético aumentaría hasta un increíble  $3.398 \times 10^{18}$  J en 2050.
3. Habríamos agotado: el petróleo, el gas, el uranio y los recursos hídricos, así como la capacidad de aumentar algunos energéticos naturales: energía eólica.
4. Habríamos contaminado hasta 5% más en el 2050 con respecto del año 2000.
5. Se emitirían hasta 947% más  $\text{CO}_2$  que en el año 1990.
6. Habríamos pagado 384 billones de dólares ( $\times 10^{12}$  USD) para que el sector energético mundial subsista, lo que significaría un 1.106% más de lo que gastó el sector en el año 2000.

## SIGUIENDO A LOS VACILANTES – GIIIA

Figura 4  
Mapa IDH-Crecimiento poblacional. La evolución siguiendo al grupo de los vacilantes

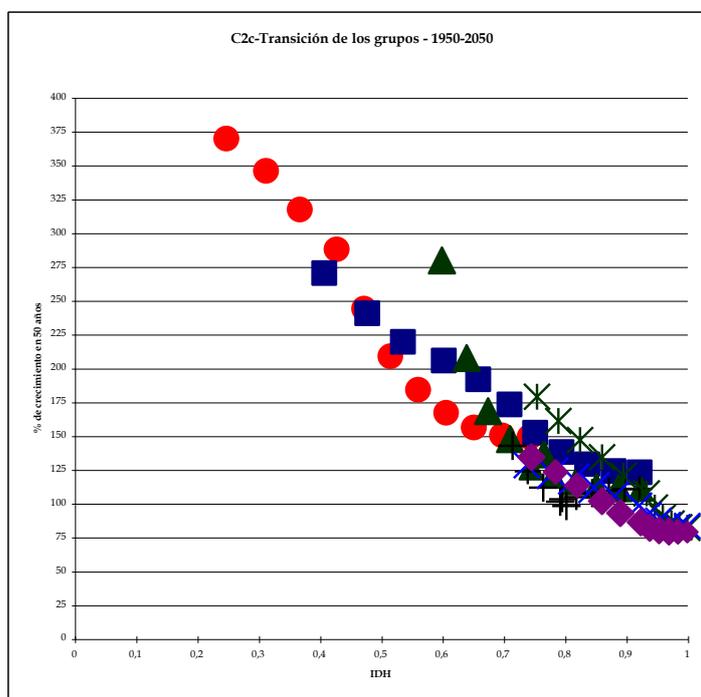


Se plantea entonces seguir el esquema que ostenta el grupo de los vacilantes (Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Portugal, Reino Unido y Suecia), que en esencia nos encamina a la estabilidad poblacional con un alto IDH, y con un consumo energético per cápita es de 168 GJ/hab, que aún puede considerarse algo excesivo. Claro que su esquema de satisfacción energética también es sustancialmente distinto al de los derrochadores y con estas modificaciones, el modelo computacional nos ofrece un panorama futuro distinto:

1. La población mundial alcanzaría los 10.730 millones de personas, pero con un crecimiento anual apenas superior al 0.01% anual.
2. El consumo energético mundial en el 2050 alcanzaría los  $1.571 \times 10^{18}$  J por año.
3. Agotaríamos: el petróleo, el gas y el uranio antes de alcanzar el 2030.
4. El impacto ambiental sería 2% menor.
5. Las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al año 1990 aumentarían un 390%.
6. El coste sería de 192 billones de dólares ( $\times 10^{12}$  USD), un 553% más de lo que gastó el sector en el año 2000.

## SIGUIENDO A LOS RECONSTRUIDOS – GIVA

Figura 5  
Mapa IDH-Crecimiento poblacional. La evolución siguiendo al grupo de los reconstruidos



Los tres países que conforman el grupo de los reconstruidos (Alemania, Italia y Japón), plantean un camino aún más moderado que los dos casos anteriores ya que su consumo energético per cápita es de 160 GJ/hab, el menor de los tres, y su modelo demográfico tendería a disminuir moderadamente la población después del año 2050, el consumo energético total se vería reducido gracias a dos factores a la vez. Su esquema de satisfacción energética puede considerarse un punto intermedio entre los dos grupos, ya que si bien tiene una alta dependencia en los hidrocarburos tradicionales, también presentan una exploración decidida en formas alternativas de generación energética.

Siguiendo a este grupo, el modelo computacional estima:

1. La población mundial alcanzaría los 10.335 millones de personas en el 2050, pero la tendencia de decrecimiento mundial frenaría demográficamente, incluso a los países subdesarrollados.
2. El consumo energético mundial en el 2050 alcanzaría los  $1.520 \times 10^{18}$  J por año.
3. Se agotan: el petróleo, el gas, el uranio y la energía eólica; todos poco después del año 2030.
4. El impacto ambiental aumentaría un 12%, principalmente por el mayor uso del carbón.
5. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  respecto al año 1990 aumentarían un 390%.
6. El costo en el año 2050 ascendería a los \$ 174 billones de dólares ( $\times 10^{12}$  USD) un 502% más de lo que gastó el sector en el año 2000, esto significaría el menor costo de los casos hasta ahora analizados, y también es consecuencia del uso de un combustible primario barato, como el carbón como base para el desarrollo de los países con un bajo IDH.

Se concluye que las tres soluciones estudiadas son insostenibles pues el elevado consumo per cápita de los tres grupos a seguir agotaría las reservas energéticas. Por tanto, las propuestas sostenibles tendrían que considerar necesariamente para los países desarrollados la mejora en el IDH aparejada de una disminución del consumo energético per cápita. También se aprecia que los modelos energéticos de los grupos GIIIA y GIVA, tienen impactos ambientales menores a los presentados por el grupo

GIIA (aunque el índice utilizado para medir este impacto no tiene un sentido explícito en forma absoluta, sí que es eficaz para comparar distintos caminos energéticos), lo cuál evidencia que el modelo energético europeo presenta algunas ventajas ambientales frente al del resto de países desarrollados.

Concluimos por tanto, que nada de lo que está haciendo la Humanidad hoy, es sostenible por sí sólo. Seguir haciendo lo que hacen los Estados Unidos, o Europa Continental o Alemania y Japón no es suficiente. Esta información ya es en sí muy importante, porque evidencia algo que muchos tratan de ignorar: tenemos un grave problema delante de nosotros y, hasta la fecha, no tenemos solución para él.

## **CASOS SOSTENIBLES**

En esa línea de intentar buscar soluciones que sean sostenibles se ha utilizado el nuevo modelo de planificación energética para intentar buscar caminos que nos conduzcan al éxito. Con ese propósito se han estudiado tres posibles caminos sostenibles para la Humanidad.

Tras el análisis de los casos anteriores se hace evidente que existen tres factores básicos que conducen a la insostenibilidad: un consumo energético per cápita excesivo, un aumento poblacional enorme y el uso de hidrocarburos como base de nuestro consumo. Con esto en mente se plantearán algunos casos en los que se busca que los países con bajo IDH corrijan algunos errores en los modelos energéticos de los tres países punteros, y estos países con alto IDH cambien el actual esquema energético para conseguir los caminos sostenibles para el globo.

Los casos estudiados se denominan: el sostenible débil, fuerte y el alternativo. Siendo el primero el que menos se aleja del comportamiento actual y por lo tanto menos desviaciones presenta. Se podría considerar como un mínimo indispensable para conseguir la sostenibilidad. En cambio, el caso sostenible fuerte, explora una combinación de variables que reflejarían un cambio profundo en nuestro actual modelo energético y social, pero que así conseguiría importantes mejoras medioambientales. El tercer caso, el alternativo, plantea un punto intermedio entre ambos caminos, uno de tantos, por lo que se refuerza la teoría que afirma que existen varias posibilidades para conseguir la sostenibilidad.

En lo que respecta a la población, el caso débil plantea un aumento global de la población en un 43% en 50 años. Esto representaría una disminución de casi un 14% respecto de las previsiones de los organismos internacionales como la ONU. El caso sostenible fuerte plantea un escenario de control demográfico más estricto, para que el aumento en 50 años sólo sea de un 31%. El caso alternativo plantea un camino intermedio, con un aumento poblacional del 37%. La figuras 6, 7 y 8 muestran la evolución en el gráfico IDH/Crecimiento de los tres casos sostenibles.

Figura 6  
 Mapa IDH-Crecimiento poblacional. El caso sostenible débil

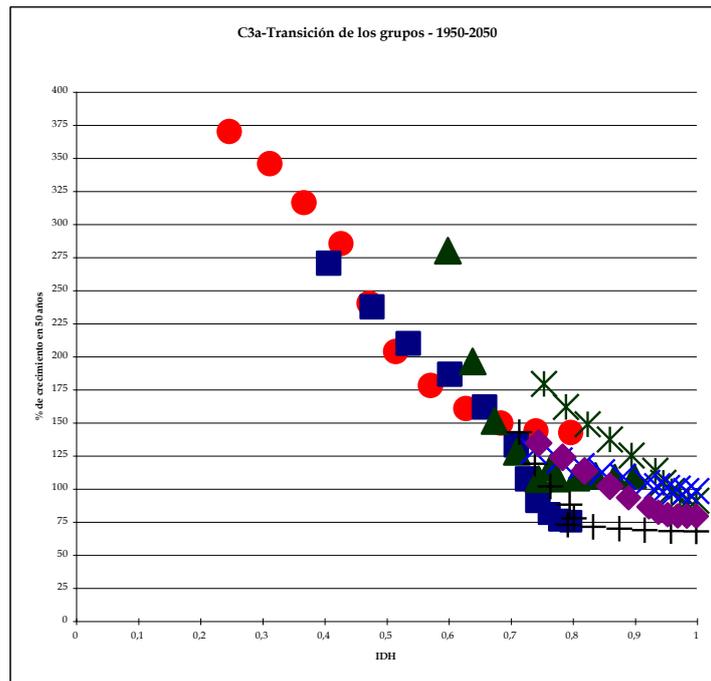


Figura 7  
 Mapa IDH-Crecimiento poblacional. El caso sostenible fuerte

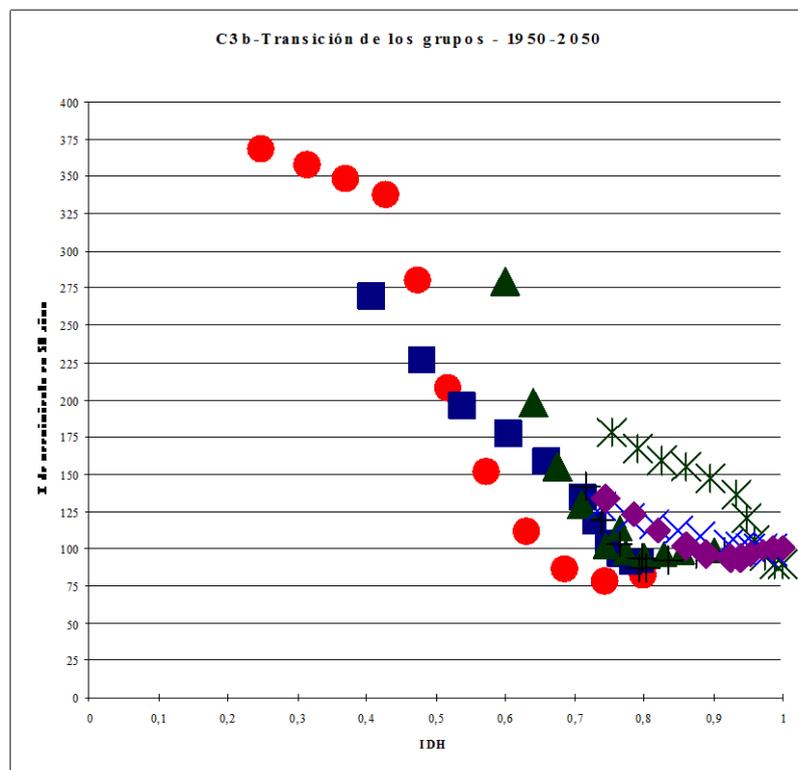
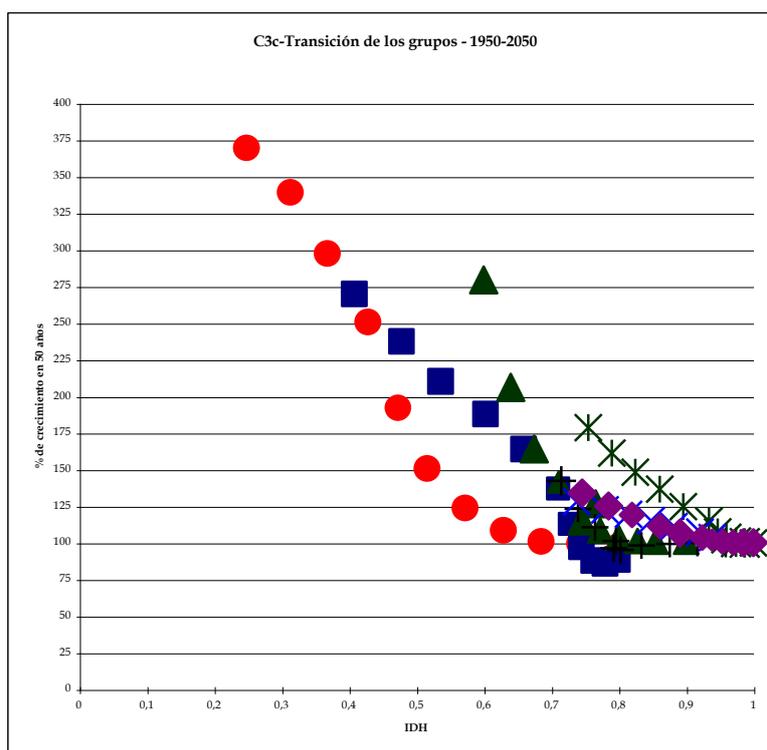


Figura 8  
 Mapa IDH-Crecimiento poblacional. El caso sostenible alternativo.



Los tres casos planteados asumen que para que se consiga la sostenibilidad es necesario cambiar la estructura de nuestro suministro primario de energía para incorporar al menos un 30% de energéticos naturales. En lo particular, la cesta energética del caso débil se definió como aquella que sustituiría el uso masivo de petróleo y gas con energía nuclear y nuevas tecnologías con energías naturales en los países desarrollados, y además, para los países en vías de desarrollo carbón.

El caso sostenible fuerte plantea una solución mucho más drástica abandonando el uso masivo de los hidrocarburos tradicionales y prescindiendo completamente de la energía nuclear, aumentando la dependencia en las nuevas tecnologías de energías naturales. Y por último, el caso alternativo buscaba el camino intermedio utilizando nuevamente la energía nuclear pero adoptando de manera masiva el uso de nuevas tecnologías en este campo, como los reactores de cría. En términos porcentuales las cestas de cada uno de estos casos son:

Tabla 4  
 Síntesis de condiciones energéticas generales para los escenarios sostenibles.

	<i>Caso Sostenible Débil - %</i>	<i>Caso Sostenible Fuerte - %</i>	<i>Caso Sostenible Alternativo - %</i>
Petróleo	20.8	19.6	20
Carbón	18.3	18.4	9
Gas natural	9.7	10.8	10
Nuclear	6.2	0	21
Gran hidráulica	5.2	6.2	5
Otros	39.8	45	35

En lo que concierne a las consecuencias de estos casos lo más relevante sería que en ninguno se considera que en los próximos 50 años se agotaran las reservas conocidas de los hidrocarburos tradicionales o las de uranio. El aumento del IDH global es generalizado, lo cual significaría sacar del subdesarrollo al 80 % de la población mundial. Todo esto disminuyendo el impacto ambiental global, sin que el costo global sea excesivo. Los principales indicadores de sostenibilidad tomados para hacer estas consideraciones se resumen en:

Tabla 5  
Síntesis de condiciones generales para los escenarios sostenibles.

	<i>Caso 1</i> <i>Sostenible Débil</i>	<i>Caso 2</i> <i>Sostenible Fuerte</i>	<i>Caso 3</i> <i>Sostenible Alternativo</i>
Población 2050 (10 <sup>6</sup> hab.)	8 673	7 954	8 350
Consumo Energético 2050 (10 <sup>18</sup> J)	805	699	743
IDH (medio mundial) (% 2050/2000)	2.7	3.5	8.1
Recursos agotados	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Impacto Ambiental (% 2050/2000)	-1.12	-0.45	-8.89
CO <sub>2</sub> (% 2050/1990)	138.65	109.76	90.2
Costo (% 2050/2000)	247	200	264

## CONCLUSIÓN

En definitiva, se demuestra que es posible diseñar y construir un modelo de planificación energética global acorde con el desarrollo sostenible, que es capaz de orientar al estratega energético mostrándole los posibles caminos que pueden elevar el desarrollo humano, conservando el medio ambiente y los recursos energéticos para las generaciones futuras, pero sin descuidar los aspectos tecnológico, social y económico.

Nuestro punto de partida es el hacer consciente que nuestra sociedad requiere energía para satisfacer las necesidades de sus integrantes, presentes y futuros. Esto es esencial, ya que hay que asumir que esa energía es indispensable, y por tanto debemos administrar su uso de la mejor manera posible.

Los modelos computacionales actuales, aunque efectivos y útiles, no son los adecuados para la planificación orientada hacia el desarrollo sostenible, ya que no contemplan que la mayoría de la población mundial eleve su Índice de Desarrollo Humano. Hay que crear esos nuevos modelos, asumiendo que la dirección del camino futuro lo eligen aquellos con las condiciones históricas, sociales y económicas adecuadas, y los demás tratarán de emular el camino que siguieron aquellos que lograron aquello que añoran.

El presente trabajo demuestra que continuar con un desarrollo que siga el esquema que ostentan cualquiera de los tres grupos con un alto Índice de Desarrollo Humano, es insostenible, pero también demuestra que es posible encontrar caminos sostenibles en el terreno energético, los cuales se basan, esencialmente en: la disminución del consumo energético excesivo y el cambio en el tipo de energéticos que consumimos según sus propiedades y características. Todo ello mejorando incluso las perspectivas económicas que el pronóstico de los modelos tradicionales auguran.

Actualmente diversos organismos y sectores claman por conseguir un desarrollo sostenible, un desarrollo que permita la satisfacción de las necesidades de todos los seres humanos, presentes y futuros, que respete el medio ambiente, que sea técnicamente posible, económicamente viable y

filosóficamente justificable. Este trabajo pretende ser una modesta herramienta de prospectiva para colaborar a solventar ese reto.

## REFERENCIAS

1. Administración de la Información en Energía (EIA) (2003): *International Energy Outlook 2003*, EE.UU., DOE/EIA, 272 pp. en: [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html)
2. Administración de la Información en Energía (EIA) (2003): *Model documentation report: System for the Analysis of Global Energy markets*, EE.UU., DOE/EIA, 345 pp., en: [http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/modeldoc/m072\(2003\)1.pdf](http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/modeldoc/m072(2003)1.pdf)
3. Administración de la Información en Energía (EIA) (2003): *The National Energy Modeling System: An Overview 2003*, EE.UU., DOE/EIA, en: <http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/forecasting/05812003.pdf>
4. Administración de la Información en Energía (EIA) (2003): *NEMS, International Energy Module*, EE.UU., DOE/EIA, 72 pp., en: <http://tonto.eia.doe.gov/ftproot/moelodoc/m071.pdf>
5. Agencia Internacional de la Energía y Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (1993): *World Energy Outlook to the Year 2010*, Paris, IEA.
6. Banco Mundial: “*Tools for Assessment: Models and Databases*“ en: [www.worldbank.org/html/fpd/em/power/EA/methods/tools.stm](http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/EA/methods/tools.stm)
7. BIFANI, Paolo (1999): *Medio ambiente y desarrollo sostenible, 4a ed. España*, IEPALA, 593 pp.
8. Consejo Mundial de la Energía (World Energy Council – WEC) (1993): *Energía para el mundo del mañana (realidades, opciones, objetivos)*, Madrid, 398 pp.
9. Consejo Mundial de la Energía (WEC) (2000): *Energy for tomorrow world– acting now (WEC statement 2000)*, UK, Atalink Projects Ltd/WEC, 146 pp.
10. DÍAZ Pineda, Francisco (ed.): *Ecología y desarrollo (Escalas y problemas de la dialéctica desarrollo-medio ambiente)*, España, Complutense, 177 pp. (Debate)
11. EHRLICH, Paul y Anne EHRLICH (1993): *La explosión demográfica. El principal problema ecológico*, Barcelona, Salvat, 334 pp.
12. GREENE, David L. (2003): “*Long-Term Energy Scenario Models: A Review of the Literature and Recommendations*“, EE.UU., Oak Ridge National Laboratory, 6 pp. en: [www.ott.doe.gov/pdfs/models2050.pdf](http://www.ott.doe.gov/pdfs/models2050.pdf) (2001)
13. HAFELE, Wolf (1981): *Energy in a Finite World: Paths to a Sustainable Future*, (2a ed.) EE.UU., Ballinger Pub. Co., Cambridge.
14. JEFFERSON, Michael (2000): “*Long term energy scenarios: the approach of the World Energy Council*“, en: *International Journal Global Energy Issues*, Vol. 13, Nos. 1-3, en: [www.environmental-center.com/magazine/inderscience/ijgei/art11.pdf](http://www.environmental-center.com/magazine/inderscience/ijgei/art11.pdf)
15. JIMÉNEZ, Luis M. (2000): *Desarrollo sostenible. Transición hacia la coevolución global*, Madrid, Pirámide, 293 pp.
16. LEFF, Enrique (2001): *Ecología y capital (Racionalidad ambiental, democracia participativa y desarrollo sustentable)*, 4ª ed., México, Siglo XXI, 437 pp.
17. MEADOWS, Donella H., et. al. (1992): *Más allá de los límites del crecimiento*, Madrid, El País S.A./Aguilar S.A., 355 pp.
18. Naciones Unidas, “*Our Common Future*“: Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo, EE.UU., Oxford University Press, 1987.
19. Naciones Unidas (2001): *Human development report 2001*, N.Y., UNDP/Oxford University press, 264 pp.
20. Naciones Unidas (2000): *World energy assesment*, EE.UU., UNDP.
21. Naciones Unidas (2002): *UNDP and Energy for sustainable development*, EE.UU., UNDP.
22. NAKIĆENOVIĆ, Nebojša, ed. (1998): *Global energy perspectives*, UK, Cambridge University press, 299 pp.
23. NAREDO, J.M. y A. VALERO (1999): *Desarrollo económico y deterioro ecológico*, España, Visor/Fundación Argentaria, 388 pp.

24. OPSCHOOR J.B. Y REJINDERS (1991): *In Search of Indicators of Sustainable Development*, Kluwer Acad, Kuik O and Verbruggen H.
25. PINEDA, Francisco, comp. (1996): *Ecología y desarrollo (Escalas y problemas de la dialéctica desarrollo-medio ambiente)*, España, ed. Complutense, (Club de debate. Foro VII centenario ecología y desarrollo), 177 pp.
26. PRICE, David (1995): *Energy and Human Evolution*, en: “*Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*”, Volume 16, Number 4, pp. 301-19.
27. SÁNCHEZ I., Juan José (2001): *La globalización al desnudo*, España, Chaos-Entropy, 267 pp.
28. Universidad Nacional Técnica de Atenas (2000): *The PRIMES energy system model*, Grecia, Comisión Europea-Programa Joule III, 16 pp.
29. VAN BEECK, Nicole (1999): “Classification of energy models”, Holanda, Tilburg University and Eindhoven University of Technology, 24 pp. en: [greywww.kub.nl:2080/greyfiles/few/1999/doc/777.pdf](http://greywww.kub.nl:2080/greyfiles/few/1999/doc/777.pdf)