

PRESIDÈNCIA DE LA GENERALITAT VALENCIANA

CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS





EDITA: © PRESIDÈNCIA DE LA GENERALITAT
 FUNDACIÓN PREMIOS REY JAIME I

ISBN: 978-84-482-4771-3
DEP. LEGAL: V-4468-2007

IMPRIME: GRÁFICAS ANTOLÍN MARTÍNEZ S.L.
 Tel. 96 391 89 84 - www.grafamar.com



PREMIOS
REY JAIME I



ÍNDICE

PRÓLOGO	7
Hble. Sr. García Antón	
CONCLUSIONES	9
INTRODUCCIÓN	11
Dr. Ramón Tamames	
CAPÍTULO 1. CONCEPTO DE CLIMA	21
D. José Salvador Martín	
CAPÍTULO 2. EVIDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	43
Dr. José M ^a Baldasano	
CAPÍTULO 3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS FUNCIONES ECOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DEL SUELO. MECANISMOS DE RETROALIMENTACIÓN	57
Dr. José Luis Rubio	
CAPÍTULO 4. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SALUD HUMANA	73
Dr. Joan Grimalt	
CAPÍTULO 5. EL MODELO ENERGÉTICO	85
Dr. Mariano Marzo	
CAPÍTULO 6. HIDROCARBUROS, PERSPECTIVAS DE FUTURO	101
D. Luis Javier Navarro Vigil	
CAPÍTULO 7. ENERGÍAS ALTERNATIVAS, FUTURO DE LAS DIVERSAS TECNOLOGÍAS	109
Dr. Félix Yndurain	
CAPÍTULO 8. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	117
Dr. Antonio Colmenar	

CAPÍTULO 9. ENERGÍA SOLAR: FOTOVOLTAICA	133
Dr. Antonio Luque	
CAPÍTULO 10. ENERGÍA EÓLICA	141
Dr. Sergio Martínez González	
CAPÍTULO 11. ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA CLIMATIZACIÓN	155
Dr. Javier Urchueguía	
CAPÍTULO 12. BIODIÉSEL	165
D. José Antonio Moreno	
CAPÍTULO 13. OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CELULOSA	171
Dr. Santiago Grisolia	
CAPÍTULO 14. ENERGÍA DE FISIÓN NUCLEAR	179
Dr. Enrique González Romero	
CAPÍTULO 15. LA FUSIÓN COMO SOLUCIÓN: LOS DESAFÍOS	195
Dr. Francisco Castejón	
CAPÍTULO 16. SOLICLIMA. LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA PARA LA DIFUSIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	209
D. Rubén Hevia	
CAPÍTULO 17. ENERGESIS S.L. UNA SPIN-OFF DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA PARA EL IMPULSO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN CLIMATIZACIÓN	211
Dr. Pedro Fernández de Córdoba	
CAPÍTULO 18. ABENGOA	219
D. José Antonio Moreno	
CAPÍTULO 19. CAMBIO CLIMÁTICO, ¿UN RIESGO MANEJABLE?	223
Dr. Juan Velarde	

PRÓLOGO

La lucha contra el cambio climático es un fenómeno de enorme trascendencia que, como ha ocurrido otras veces a lo largo de la historia, está actuando como un verdadero catalizador social en un proceso de transformación del modelo de relación entre el hombre y su medio. Lo más significativo de este fenómeno, además de la rápida adquisición de una dimensión planetaria es que, por vez primera, las organizaciones sociales y políticas han empezado a actuar sin esperar a sufrir de pleno las catastróficas consecuencias de esta alteración del medio.

Como bien se recuerda en alguna de las ponencias de esta misma publicación, hace más de cien años ya hubo precursores que intuyeron esta alteración. El conjunto de la comunidad científica empezó a plantear ciertas evidencias de la misma a finales de los años setenta, en el pasado siglo, coincidiendo básicamente con la celebración de la 1ª Conferencia Mundial sobre el Clima. Sin la total unanimidad acerca de las causas y, sobre todo, de sus efectos, apenas dos décadas más tarde se formula el Protocolo de Kioto en el marco de las Naciones Unidas y muchas naciones, especialmente en la Unión Europea, empiezan a tomar medidas incluso antes de que se produzca su entrada en vigor.

Hoy en día, hasta los países más reticentes están reconociendo la necesidad de esa lucha que se ha convertido en el caso más paradigmático de la aplicación del “principio de precaución”, por el que los poderes públicos están actuando sin necesidad de esperar a tener certezas científicas absolutas sobre todos los elementos de este proceso; y lo están haciendo porque lo que está en juego es la seguridad y salubridad del planeta, y la sostenibilidad de su desarrollo.

Ésta es la manera de actuar más responsable, no sólo con nuestra generación, sino sobre todo con las generaciones futuras. Y va a permitir que, también por primera vez, las medidas no se dirijan solamente a mitigar un suceso de difícil reversión sino, especialmente, a preparar nuestra adaptación para hacer menos traumático el tránsito hacia una nueva situación económica, social y ambiental producida por los cambios en nuestro modo de relacionarnos con el medio.

Por eso es muy importante que las organizaciones sociales, empezando por los poderes públicos, sigan escuchando a las comunidades científicas, les proporcionen los necesarios medios para trabajar y establezcan los cauces precisos para hacer llegar las soluciones.

Hoy más que nunca, son necesarias estrategias de lucha contra el cambio climático que integren este objetivo en todas las políticas sectoriales, orientándolas con visión global y a largo plazo con el máximo consenso social. La Comunidad Valenciana no es ajena en absoluto a esta necesidad y por ello, el Consell, en ejercicio de su responsabilidad ambiental, tiene como uno de sus objetivos establecer una Estrategia Valenciana para el Cambio Climático, elaborada con rigor y adoptada con el máximo consenso.

En esta tarea común de prevención y atenuación de los efectos del cambio climático, es una necesidad y un privilegio poder contar con el asesoramiento especializado de la comunidad científica y en ese sentido, las excelentes relaciones de colaboración y la opinión especializada de los miembros del Alto Consejo Consultivo en Investigación y Desarrollo de la Generalitat van a seguir siendo muy importantes a la hora de elaborar las estrategias más eficaces.

Reuniones como la que ha permitido desarrollar esta publicación, bajo los auspicios del Alto Consejo, son el mejor camino para que la comunidad científica se exprese y comunique a la sociedad el "estado de la cuestión", orientando a la misma y a sus representantes en la búsqueda de las mejores soluciones a los problemas que nos afectan.

JOSÉ RAMÓN GARCÍA ANTÓN

Conseller de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda

CONCLUSIONES

DECLARACIÓN DE LA GRANDA

Científicos y participantes en la Reunión: "CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS" recuerdan a la Sociedad y a sus líderes, tanto sociales como políticos que son necesarias actuaciones urgentes:

- 1) Promover al máximo la eficiencia y el ahorro energético.
- 2) La necesidad de utilizar todas y cada una de las energías disponibles como única vía para lograr el ansiado equilibrio entre desarrollo económico, seguridad de suministro energético y sostenibilidad medioambiental.
- 3) Estimular la I+D+i en todas las energías, especialmente en el campo de las renovables, dado el limitado tiempo disponible por la sustitución progresiva de ciertas fuentes de energía como son los hidrocarburos y el amenazante aumento de la concentración en la atmósfera de los gases de efecto invernadero especialmente el anhídrido carbónico, que se consideran responsables del llamado cambio climático.

La Granda, 24 de agosto de 2007

INTRODUCCIÓN

DIECISEIS TESIS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, Y SUS CONSECUENCIAS ECONÓMICAS

Ramón Tamames

Catedrático Jean Monnet por la Comunidad Europea

Premio Rey Jaime I a la Economía 1997

Premio de Conservación de la Naturaleza de la Junta de Castilla y León 1998

En el curso, dirigido por el Prof. Grisolia, sobre cambio climático, que se celebró en La Granda —la sede de la Fundación Asturiana de Estudios Hispánicos, que codirigen los Profesores Teodoro López Cuesta y Juan Velarde Fuertes—, me correspondió el lunes 20 de agosto de 2007 *dictar* la lección inaugural, que a efectos del presente libro, retitulo como “Dieciséis tesis sobre el cambio climático y sus consecuencias económicas”.

He procurado hacer una presentación escueta, centrándome en los aspectos fundamentales de las diversas cuestiones. Y aunque a veces no lo parezca, en ninguna de las tesis que aquí se exponen, me considero partidario a ultranza de una posición definitiva. Creo que conviene dejar siempre abierta una puerta a la duda y, desde luego, a investigaciones y averiguaciones ulteriores. Pero también estimo que es hora de ir fijando nuestra ubicación argumental y predictiva en uno de los problemas más serios de nuestro tiempo.

Globalización

Los años transcurridos desde 1972, desde la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente en Estocolmo hasta ahora, han dado más que razón a los pioneros que en la capital sueca dieron la señal de alarma, en la idea que va haciéndose más patente día a día, de que todos los humanos vivimos en *un solo mundo* como en su libro de ese mismo título apreciaron Barbara Ward y René Dubos, en vez de mantenerse la separación convencional en los tres de que tanto se hablaba por entonces: primero, el capitalismo desarrollado, segundo, el socialismo real, y por último el *Tercer Mundo* el del subdesarrollo, en medio de hambres, enfermedades, guerras, dictaduras, y penurias de toda clase, a modo de cuatro nuevos jinetes del Apocalipsis. Hoy lo decimos de manera aún más precisa: estamos viviendo en la globalización, dentro de la cual el medio ambiente es una cuestión decisiva.

Límites al crecimiento

En directa conexión a efectos de desvelar la situación real en términos de deterioro de la biosfera, la celebración de la Conferencia de Estocolmo de 1972 coincidió con el lanzamiento masivo del informe que una serie de científicos ligados al Massachusetts Institute of Technology (MIT) produjeron para el Club de Roma sobre *Los límites al crecimiento*. Donde se confirmó la idea del fundador del Club de Roma, el ingeniero italiano Aurelio Peccei, de vigorizar el *axioma* (una proposición que por su evidencia no necesita de demostración) de que “es imposible el crecimiento infinito con recursos finitos”.

Recursos, contaminaciones y miseria

En 1972, las mayores amenazas se cifraban en la contaminación en cuatro diferentes ámbitos: aire, con transformaciones en su composición y secuelas como la lluvia ácida de alcance transfronterizo, haciendo que el país anfitrión de la conferencia, Suecia, estuviera sufriendo las oleadas, *in crescendo*, de SO₂, que llegaban desde las Islas Británicas y Alemania; agua, con problemas ya evidentes de cantidad y calidad por el derroche ubicuo y por su deterioro manifiesto a causa de los vertidos industriales; suelo, afectado por la salinización de regadíos inadecuados, la contaminación por fertilizaciones irracionales, y todo ello sin olvidar fenómenos tan graves como deforestación, erosión y desertificación; y finalmente, el ruido con su generación de estrés en las zonas urbanas, con una problemática cada vez más intrincada.

Pero por encima de esas cuatro grandes cuestiones, fue Indira Ghandi quien realmente *puso el dedo en la llaga*, al exponer su idea de que “la mayor contaminación es la miseria”. Porque, realmente, la población humana se debatía por entonces, y aún hoy en gran medida, en medio de la tensión cotidiana de casi todos los males de una vida precaria: malnutrición, enfermedad, viviendas infrahumanas, ignorancia y penurias de todas clases.

Complejidad y leyes de malthus

Muchas cosas han cambiado desde 1972, algunas a mejor, pero en el caso del medio ambiente en sentido más estricto, todo se ha complicado, comprobándose que el planeta es un sistema de enorme complejidad, como ya significó Barry Commoner con su primera ley de la Ecología: “todo está relacionado con todo”. En otras palabras, los efectos de la retroalimentación de toda una serie de fenómenos en la biosfera, estaban y están cambiando interactivamente todos los engranajes del mundo en que vivimos.

En esa línea de complejidad, la célebre Ley de Malthus —“el crecimiento de la población supera las posibilidades de alimentarla y genera la lucha por la vida”, en su formulación más rápida— parecía relativamente simple, aunque ya su propio autor supo prever que por los avances de la ciencia y la técnica sería posible dar de comer a una población humana mucho mayor. En otras palabras, con el *homo technologicus* la primera Ley ha quedado definitivamente superada.

Pero la verdadera genialidad implícita en Malthus —que proporcionó la base dialéctica para la fundamentación de la teoría del evolucionismo, tanto en Russel Wallace como en Charles Darwin—, radica en lo que me permito llamar *la segunda Ley* de Malthus: “el planeta no tiene capacidades para asumir el impacto que genera la depredadora especie humana”. Y por eso mismo, los urbanitas han de cambiar de actitud y comportamiento en sus vidas. De forma y manera que tras haber surgido el *homo technologicus*, para contrarrestar la primera ley, ahora tiene que nacer, ya está surgiendo, el nuevo espécimen del *homo*

ecologicus. Que ha de imaginar las soluciones a los problemas de la segunda ley, lo que implica toda una serie de escenarios de claro sobrepasamiento por la creciente huella ecológica de la comunidad humana sobre el planeta y la descapitalización de su biosfera.

Sobrepasamiento y calentamiento global

El tema de sobrepasamiento es el que vamos a debatir más extensamente a lo largo de esta ponencia, en correspondencia al hecho de que actualmente, existe una evidente polarización de las polémicas ambientales en el tema del calentamiento global, sobre el cual ha sido el *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (IPCC por sus siglas en inglés) el que dio —con una serie de antecedentes que se remontan nada menos que a 1890, con los trabajos del investigador sueco Arrhenius—, la señal de alerta: las cuatro glaciaciones que se sucedieron en los últimos 400.000 años, permitieron otros tantos periodos interglaciares, en los cuales floreció la vida. Pero, en la interglaciación actual, la especie humana lo ha alterado todo con sus crecientes *emisiones de gases de invernadero* (EGI), lo que generalmente se conoce como la *incidencia antrópica*.

Los hallazgos sobre la cuestión fueron haciéndose cada vez más concluyentes —por muchos escépticos que todavía haya—, y el tras complicadas negociaciones, la primera *institucionalización* para reaccionar frente a ese fenómeno se logró con el *Convenio Marco sobre Cambio Climático*, solemnemente firmado en Río de Janeiro en junio de 1992, con ocasión de la *Cumbre de la Tierra*.

El protocolo de kioto en acción

Así comenzó un largo recorrido, cuyo siguiente hito sería el *Protocolo de Kioto*, de 1997. Texto cuyos compromisos cuantificados en forma de cuotas de EGI a reducir, se precisarían a lo largo de sucesivos encuentros. A lo cual se opusieron algunos países avanzados, miembros del Convenio Marco, como EE.UU. y Australia, pero que no llegaron a adherirse plenamente al Protocolo. Por entender que la idea del calentamiento global no dispone de suficiente base científica, y sobre todo por estimar que de él podrían derivarse constricciones muy negativas para su propio desarrollo industrial, por la limitación que implicaría del consumo de energías primarias de origen fósil.

Los grandes esfuerzos para la formalización de las cuotas de EGI en el Protocolo de Kioto, cristalizaron finalmente en el encuentro del Convenio Marco en Marrakech en 2002. Momento en el cual la Unión Europea asumió el objetivo de reducir sus EGI un 8 por 100, por referencia a los niveles del 1990, tomando como dato final la media de emisiones del trienio 2010/2012.

Ulteriormente, y tras no pocas incertidumbres, el Protocolo entró en vigor al darse las dos circunstancias previstas a tales efectos: que por lo menos 55 países lo hubieran aceptado (en 2005 ya eran más de un centenar las ratificaciones), y que las partes contratantes que ya lo hubieran ratificado supusieran más del 55 por 100 del total de las EGI. Nivel este último que se alcanzó el 16 de febrero de 2005, dos meses después de aprobarse el texto por el Parlamento de la Federación de Rusia.

El gran deshielo

Los compromisos en torno a Kioto, ya lo hemos visto, tienen como objetivo incidir en el *calentamiento global* que se origina por el *efecto invernadero*, en el intento de frenar o detener sus más nega-

tivas consecuencias. Entre ellas, la fusión de los hielos de los glaciares y los polos; fenómeno que está impulsando la subida del nivel de los océanos y mares. Lo cual, a largo plazo, tendría las más dramáticas implicaciones sobre amplias zonas costeras, sin que pueda predecirse cuál sería el efecto final, con estimaciones que van desde unos pocos metros, hasta 70. En este último caso (fusión total), dos tercios de la población humana, la asentada en las áreas costeras, se vería severamente dañada, en el largo plazo, que los menos optimistas acercan al 2100. En cualquier caso, hoy por hoy, el deshielo está creando nuevas situaciones, en especial en los glaciares de montaña —prácticamente todos ellos en clara regresión— y en los dos polos.

En el contexto de ese *gran deshielo*, cabe que surjan complicaciones muy diferentes. Pues como ha llegado a afirmarse (John Elkington *dixit*), en apariencia de manera paradójica, toda la Europea Occidental podría entrar en un acelerado proceso de enfriamiento. Desde el punto y hora en que el agua dulce de los hielos fundidos en el hemisferio Norte disminuiría la salinidad de los mares, alterándose con ello el curso de las actuales corrientes marinas, y sobre todo la célebre *del Golfo* (de México), que actúa como *gran calefactor* que suaviza el clima europeo desde Portugal a la costa de Noruega.

Sin embargo, esa teoría está en curso de revisión, tras el diseño y la aplicación de 23 modelos climáticos por el IPCC, que en febrero de 2007 declaró que es muy improbable que el crucial flujo de agua caliente hacia Europa se paralice en este siglo. “El balance final muestra que la atmósfera está calentándose tanto, que una ralentización de la corriente del Atlántico Norte nunca podrá enfriar a Europa”. Pues para que la corriente de agua cálida parase por completo, la capa de hielo de Groenlandia tendría que fundirse con suficiente rapidez como para crear una enorme acumulación de agua dulce en el Atlántico Norte, y eso no va a suceder. (Walter Gibas, “Se enfría el temor a otra Edad de Hielo en Europa”, *The New York Times-El País*, 31.V.07.)

El ártico: internacionalmente disputado

Todo lo visto anteriormente, el deshielo, está provocando un verdadero *boom* de exploraciones de todas clases en busca de yacimientos de hidrocarburos y minerales. Lo que con toda seguridad será el prólogo de una seria discusión por la concesión de futuras explotaciones, sobre todo en el hemisferio boreal: Alaska, Canadá, Groenlandia, y todo el Norte de la Federación de Rusia —desde la Península de Kola hasta el Estrecho de Bering—, que son, sin duda, las áreas que más van a beneficiarse del calentamiento global, por la dulcificación del clima. Lo cual inducirá una tensión permanente, en términos de explotaciones mineras primero y después incluso de turismo, y tal vez hasta de desarrollo agro-forestal.

Por lo demás, resurgirá la cuestión del *libre paso del Noroeste*, la legendaria vía de navegación libre de hielos, desde la punta Sur de Groenlandia (el ya mencionado Cabo Farvel) hasta el Norte de Alaska; bordeando las costas boreales de la Tierra de Baffin y de la gran Isla Victoria, todo ello territorio canadiense, con soberanía de paso propio, pero que ya está poniéndose en duda por EE.UU.

Cuantificaciones en kioto: entre el cero y el infinito

Entrando ahora en la cuantificación del tema, cabe recordar cómo a finales de la década de 1950, Arthur Koestler escribió una novela, que en España se tradujo con el título de *El cero y el infinito*, definitivo del máximo margen, entre el todo y la nada. Una referencia que *hic et nunc* es muy útil para expresar los dos extremos del coste que podría derivarse del Protocolo de Kioto, o de lo que podría suceder si Kioto no se aplicara a los problemas del calentamiento global.

Esa distinción entre los dos extremos, de escépticos y preocupados al máximo, se sitúa efectivamente *entre el cero y el infinito*. Lo primero por quienes manifiestan rotundamente que el calentamiento global es un *cuento de terror*, y que por ello mismo, lo más conveniente es quedarse en cero y olvidarse del tema. En el polo opuesto, el cambio climático, si no se ataja, podría significar una trágica alteración del medio en que vivimos y por ello mismo ha de frenarse cueste lo que cueste.

La tragedia de los bienes comunes y Gaia

En definitiva, las mediciones sobre cómo y con cuánto combatir el fenómeno más controvertido de nuestro tiempo, todavía no han permitido la unanimidad, siendo el primer problema la falta de consenso sobre si la cuestión del calentamiento global de origen antrópico es real. Y para evitar ese escollo y avanzar en el futuro inmediato hemos de referirnos a dos cuestiones. La primera de ellas, la *tragedia de los bienes comunes*, y la segunda, la *hipótesis de Gaia*.

En cuanto al primer asunto, el Protocolo representa un claro principio de racionalización, al preconizar la administración conjunta del *bien común* que es la atmósfera, que no tenía dueños concretos responsables y bien definidos por cada kilómetro cúbico de aire. De modo que hasta Kioto se producía la auténtica *tragedia de los bienes comunes*, esto es, el derroche y el deterioro de un patrimonio común, la atmósfera (pero también los océanos, los bosques tropicales, etc.), porque carecía de *propietarios que la cuidaran*.

De ahí que la idea de fijar topes a las emisiones, con el propósito de reducirlos o incluso llevarlos a cero algún día, es algo nuevo y trascendente: la génesis de una *Contabilidad Internacional de la Atmósfera*, con unos compromisos de quienes se consideran propietarios-responsables. Así, los *bienes comunes* amenazados, podrán convertirse en *bienes globales*, debidamente administrados por una organización conjunta.

La segunda cuestión sobre la *hipótesis de Gaia*: con Kioto se ayuda al sistema autorregulador del planeta, abrumado por los humanos depredadores, para que no se produzca el colapso vaticinado por James Lovelock, según veremos luego. Y esas dos cuestiones: bienes globales, y ayuda a Gaia son ya de por sí más que suficientes para justificar Kioto.

El temerario rechazo de Kioto Y EL PRECEDENTE DEL invierno nuclear

Pero las dos indicaciones hechas, válidas como son, no significan que la controversia sobre el cero y el infinito del coste de aplicar Kioto esté resuelta. Salvo que se acepte la forma en que se zanjó otra polémica parecida, desencadenada en 1983 a raíz del *Congreso Mundial de Científicos* de Washington. Cuando expertos estadounidenses, soviéticos, y del resto del mundo, se reunieron para estimar cuáles podrían los efectos de una guerra nuclear.

La conclusión que por métodos simulatorios se alcanzó en ese cónclave, para no hacer larga la historia, fue terminante: el peor efecto de una contienda atómica no sería ni las grandes ondas explosivas, ni el efecto térmico, ni tampoco la ulterior lluvia radiactiva. Lo más brutal estaría en el *invierno nuclear*, el largo oscurecimiento del sol que podría cambiar la vida en el planeta con amplias áreas de extinción de la misma.

Pero ante la simulación con el modelo sofisticado que se ideó (por Carl Sagan y otros), hubo toda clase de escepticismos: "el mundo lo aguanta todo y no se acabará: sigamos armándonos nuclearmen-

te...". Y es que para los recalcitrantes alentadores del armamentismo en los dos bloques Este/Oeste del *complejo industrial militar* (Eisenhower *dixit*, 1960), la única verificación del peligro del invierno nuclear no habría sido otra que una III Guerra mundial... que afortunadamente no llegó. Entre otras cosas porque en Reykiavik, 1986, Reagan y Gorbachov iniciaron el control y desarme parcial de las ojivas letales.

Ahora puede decirse que sucede algo parecido con el cambio climático por el calentamiento global: siempre se encuentran explicaciones o excusas para continuar, sin mayores alarmas, como si no pasara nada. Porque no se ve más allá del corto círculo local, y porque a causa de intereses inmediatos no se aprecia la necesidad de cambiar el estado de cosas en que nos encontramos. Y conste que en esa dirección, lo que ahora planteamos, no es un *descargo de conciencia*, para luego, en medio de la catástrofe, decir aquello de "ya lo advertimos".

Kioto y calidad de vida

Efectivamente, son muchos —y el IPCC el primero— los que aseguran que ya no caben más dilaciones, pues lo que está pasando con la atmósfera es posible resumirlo en el algoritmo TL²: *too little, too late*, demasiado poco y demasiado tarde. En la idea de que los procesos ya en marcha desde comienzos de la revolución industrial, tienen carácter irreversible, en la hipótesis de que los gases de invernadero ya acumulados en la atmósfera estarán en ella seguramente, un centenar de años. Para muchos ya existen suficientes razones para pensar que el cambio está absolutamente desbloqueado, y que como diría un castizo, "será lo que Dios quiera".

Pero no es así. Porque lo importante es que si con Kioto no va a resolverse, según tantos indicios, el problema del cambio climático, sí que tendrá una importante incidencia en la calidad de vida en términos de salud mundial, creciente eficiencia energética, y mejor aprovechamiento de todos los recursos naturales con una gestión adecuada. Todo ello con efectos especialmente favorables en las zonas urbanas de naciones emergentes como China e India, donde la situación de deterioro ambiental ha llegado a hacerse patética en áreas muy extensas. Por lo cual, esos dos países, y otros, habrán de aceptar, a partir de 2012, el control de emisiones que en la primera versión de Kioto no se fijaron al ser consideradas *naciones emergentes* que todavía podrían quedar libres de compromisos.

En EE.UU. también hay defensores de las políticas de Kioto

Como ya hemos señalado antes, las autoridades federales de Washington D.C. no están por Kioto. No obstante lo cual, el tema de la *emisiones de gases de invernadero* (EGI) presenta un panorama muy activo en EE.UU., como tantas veces se ha puesto de relieve. En ese sentido, el alcalde de Seattle, una de las urbes más ecologistas de EE.UU. consiguió promover una especie de *Kioto* para 270 ciudades de toda la Unión norteamericana. Y por otro lado, siete estados del Nordeste están aplicando medidas de estabilización de las EGI, mediante la llamada *Regional Greenhouse Gas Initiative*.

Adicionalmente, en California, su Gobernador Schwarzenegger (a pesar de que algunos le llamen *Terminator*), se han planteado la reducción de las EGI en un 25 por 100 para el 2020, y del 80 para el 2050. Además, se obligará a disminuir las EGI entre un 20 y un 30 por 100 para el 2016 en toda clase de vehículos.

Por otra parte, los efectos del huracán Katrina de 2005 en Nueva Orleans, han concienciado a numerosas fundaciones y corporaciones, incluida la *Evangelical Climate Initiative*, con 86 líderes de la citada confesión cristiana, en pro de abordar el tema del cambio climático.

En fin de cuentas, está dentro de lo posible que EE.UU. ingrese en el futuro en la dinámica de Kioto, aunque sea más con la idea de neutralizar los peligros que implican China e India, que para el 2015 van a tener EGI más impactantes que las de EE.UU. y la de UE juntas. Por lo cual, una serie de expertos, entre ellos Robert Socolov, de la Universidad de Princeton, está preconizando para los dos mayores países emergentes, y también para el resto del planeta, el secuestro de CO₂ que emana del carbón, que va a seguir siendo el combustible más consumido. Como también se pide una utilización más intensa de las energías renovables, y se recomienda acabar con los precios políticos para los carburantes fósiles, a fin de evitar su ingente derroche actual.

El efecto Al Gore

En el sentido que apuntamos de *kiotizar* EE.UU., y aunque Al Gore tiene a muchos en contra de sus ideas y prédicas, la verdad es que la entrevista que le hicieron en marzo de 2007 en el semanario *Time*, es de lo más alentadora. Sobre todo, en los pronunciamientos muy prometedores de quien fuera candidato a las presidenciales de noviembre de 2000 en EE.UU., cuando obtuvo más votos populares que George W. Bush.

Más concretamente, Al Gore se pronuncia con toda claridad por el esfuerzo para frenar el calentamiento global, que es el tema central de su célebre película (con David Guggenheim como director, y premiada con un Oscar en 2007) de título *An Inconvenient Truth*, sólo mediocrementemente traducida en España como *Una verdad inoportuna*.

Al respecto, Gore dio gran importancia a "la querella planteada por 12 Estados de la Unión ante el Tribunal Supremo al Gobierno Federal, para que la *Agencia de Protección de Medio Ambiente* (EPA) considere el CO₂ como uno de los factores a tener en cuenta en las *leyes de aire limpio*, va a ser definitiva". Y así sucedió, pues finalmente llegó el pronunciamiento del Tribunal, poco tiempo después, contra el Gobierno Bush y a favor de la actitud Kioto anti-CO₂.

Todo podría empezar a cambiar incluso en EE.UU., una idea que me permití exponer hace ya tiempo, y que se ha concretado el 31 de mayo del 2007, bajo una auténtica presión mundial sobre el Presidente, quien ese día presentó una nueva estrategia de lucha contra el cambio climático, proponiendo una cumbre de los 15 principales países emisores de gases contaminantes, "a celebrar en EE.UU. el próximo otoño" (en referencia de Antonio Caño, en su artículo "Bush propone una cumbre de los países más contaminantes", *El País*, 1.VI.07). Una cumbre que en caso de salir adelante, sería un nuevo punto de partida en la concepción del tema por parte de EE.UU.: una especie de *Kioto-2* al que Washington tendría la oportunidad de asociarse.

Bangkok 2007 e informe Stern: todavía estamos a tiempo

A propósito de todo lo anterior, y como información reciente, debemos traer aquí los resultados a que llegaron los científicos del IPCC, en Bangkok, a principios de mayo de 2007. En ese encuentro, al final de varias sesiones, se manifestó con toda claridad y de manera contundente que: "la comunidad internacional tiene los métodos científicos, los recursos, y el tiempo necesario por delante para frenar el cambio climático. En esa dirección, hay que reducir las emisiones de gases de invernadero (EGI) entre el 50 y el 75 por 100 (con base en 1990) antes del año 2050, a fin de frenar el calentamiento del planeta para no superar los niveles que de otro modo acabarían convirtiéndose en incontrolables".

Los expertos del IPCC lo tuvieron claro: aspirar a que las EGI se sometan a una reducción acelerada a partir de 2015. En la idea de que tales medidas costarían, como mucho, el equivalente al 3 por 100 global del PIB mundial que se genere entre el 2015 y el 2030; algo así como el 0,2 por 100 de cada PIB anual a lo largo de los tres lustros indicados.

De confirmarse todos los cálculos comentados, puede inferirse que salvar la Tierra sería una de las operaciones más rentables a acometer. Y como recalca el propio IPCC, “será mejor actuar al bajo coste previsto, en vez de incurrir en el desastre de la inacción, para a la postre intentar, cuando sea demasiado tarde, controlar la situación con gastos absolutamente inconmensurables y ya sin ningún resultado efectivo”.

Pero frente al intento de solución de los científicos, una vez más se opusieron no sólo EE.UU. y Australia, sino también las dos grandes potencias emergentes, China e India, que trataron de lograr en Bangkok un texto final menos concreto en cuanto a la necesidad de reducir las emisiones de CO₂, afianzados todavía en las antiguas hipótesis del alto coste. Temiendo siempre que su rápido crecimiento podrá verse mermado si aceptan grandes compromisos ecológicos; y alegando además que el peso de la reducción de las EGI debe recaer en las economías más desarrolladas, principalmente de Europa y EE.UU. En razón a que generan contaminaciones *per capita* equivalentes de tres a cinco veces las de China, y más aún las de India.

Pero ese razonamiento ya no tiene base argumental suficiente, porque ya en 2007, el antiguo *Celeste Imperio* superará a EE.UU. en volumen global de contaminación. Y eso es lo que al final verdaderamente importa. Porque la Naturaleza no entiende de *percapitas* a los efectos de la composición de su atmósfera.

La conclusión principal de Bangkok, insistimos, es que *aún estamos a tiempo*. Todavía no es demasiado tarde para salvar el planeta si se actúa con decisión, y utilizando las tecnologías ya disponibles. Por eso, la opción de “quedarse de brazos cruzados, no es aceptable”.

Y en línea con la reflexión que estamos haciendo, obligadamente hemos de evocar el famoso *Informe Stern*, el trabajo realizado por el Lord del mismo nombre, economista y profesor en la *London School of Economics*, por encargo del primer ministro británico Tony Blair. Tal vez con segundas intenciones por parte de éste, pues las preocupaciones del *Premier*, con sus continuas promesas de que iba a convencer a Bush para que entrara en la disciplina de Kioto, podrían tener bastante que ver —es lo que manifiestan sus críticos más vitriólicos—, con la idea de crear una *cortina de humo* para que se olviden sus implicaciones en la sangrienta y brutal guerra de Irak.

Por lo demás, el *Informe Stern* peca de un exceso de previsiones cuantificadas, sobre los efectos económicos del cambio climático, y de lo que se llama el *ratio coste-beneficio* a la hora de tomar decisiones, en pro de ajustes que tendrán un precio —y eso es verosímil— mucho menor que las consecuencias desastrosas de no hacer nada. Todo eso está bien, en principio, y como forma de ir calculando impactos. Pero aventurarse, a partir de esas primeras cifras, en concreciones como las que hace la señora Ministra de Medio Ambiente, Doña Cristina Narbona, de si las lluvias van a disminuir un 30 o un 40 por 100 en la *Iberia seca*, me parece demasiado minucioso a estas alturas de la película.

Una reflexión conveniente y la hipótesis de Gaia

Sería mucho mejor, sin rehuir por ello la disponibilidad de datos y de predicciones, que resumiéramos la cuestión de manera más sencilla y operativa: “El asunto es grave, y va a peor. Por eso mismo, lo que

hagamos hoy no va a perderse en el vacío de las acciones inútiles”. Dicho de otra forma, hemos de entrar en una política de freno del cambio climático, sobre el cual ya hay evidencias más que suficientes para que se sepa que, en gran medida, se debe al comportamiento de la especie humana, la célebre *incidencia antrópica*. Y sobre todo, y a corto plazo, esas medidas son absolutamente necesarias, ya lo vimos antes e insistimos ahora ya en la recta final; por razones económicas y de calidad de vida, para acabar con el derroche energético, asegurar stocks de materias primas vía ahorro y recuperación, y devolver a la atmósfera una composición más sana de la que hoy por hoy padecemos.

Y como colofón de lo anterior, hemos de expresar gratitud a quienes están poniendo en un brete la sensación de la “ciudad alegre y confiada en la que nunca pasa nada”. Y en la cual, como dicen los anglosajones, *business as usual*. Porque en medio de las preocupaciones que nos acosan sobre el tema ecológico máximo de nuestro tiempo, es admirable el vigor individual de los seres humanos. Como sucede con James Lovelock, que a sus 86 años publicó en 2006 su nuevo libro: *La venganza de Gaia*. En línea con su hipótesis, ya antes aludida, de que el planeta Tierra (simbolizado por los griegos en esa diosa), tiene grandes capacidades de autorregulación.

Claro que con un cierto límite, que viene dado por la que me permito llamar *Segunda Ley de Malthus*. Según la cual, tales capacidades se colmatan por poblaciones cada vez más numerosas y con medios tecnológicos crecientemente brutales en lo que concierne a sus impactos, incluyendo las EGI antes referidas; que vienen a ser el arma letal más importante, muy por encima —y la frase es de David King, asesor del citado Tony Blair— del *terrorismo internacional*.

En su nuevo libro, que algunos consideran un a modo de *testamento científico*, Lovelock adopta un tono profético, convencido de que el final de la humanidad sobre la Tierra podría estar muy cerca. Argumentando para ello que ante los ataques humanos a Gaia, ésta se encuentra en trance de preparar su venganza; deshacerse de la especie más depredadora, que se ha salido de cualquier límite de lo razonable.

Está bien la advertencia contra la idea antrópica de la especie elegida y perdurable, y que además nos recuerda que no somos tan diferentes de otros especímenes animales. De modo que los humanos podrían acabar en fósiles del futuro. Una tesis formulada hace tiempo, si bien fue en 1982 cuando el profesor alemán Heinrich K. Erben, planteó ese supuesto de forma nítida.

Ahora, Lovelock, con muchos más argumentos, viene a decir que Gaia no necesita de la humanidad para pervivir, pues el mundo puede seguir funcionando sin necesidad de nuestra presencia. Y yo agregaría: eso podría ser así, pero aún existe la esperanza en el fondo de la *caja de Pandora*, si nos comportamos como la especie más inteligente que somos y asumimos el papel a que nos obliga el respeto a Gaia.

Y volvemos así a la segunda Ley de Malthus de modo que si tras haber surgido el *homo tecnológico* para contrarrestar su primera versión, ahora tiene que nacer, ya está surgiendo, el nuevo espécimen del *homo ecológico*. Que ha de imaginar las soluciones a los problemas de la segunda expresión de la misma ley, para preservar el planeta pensando en las generaciones venideras.

CAPÍTULO 1

CONCEPTO DE CLIMA

José Salvador Martín González

*Director del Centro Meteorológico Territorial en Cantabria y Asturias
Meteorólogo Superior del Estado
Licenciado en Ciencias Físicas*

Introducción

Desde el punto de vista etimológico clima viene de “klimo” (palabra griega) que significa

“inclinación”, refiriéndose a la inclinación del eje de la Tierra sobre el plano de la elíptica. Las primeras clasificaciones climáticas se atribuyen a Ptolomeo (4º siglo.A.C) en base a estimar el aumento sucesivo de la duración del día, que estableció 24 áreas climáticas en la Tierra. Clasificaciones más recientes se deben a numerosos estudios de geógrafos y climatólogos.

La Climatología es una de las ciencias atmosféricas mas importantes de la actualidad, incluso en los momentos actuales cobra máxima actualidad como de todos es sabido y conocido anteponiéndose incluso a la misma Predicción Meteorológica. Yo digamos la mágica palabra “Clima” y que sin embargo se sigue manejando de forma equivocada entremezclada con “Tiempo”. Este viene a ser “estados efímeros de la atmósfera con apenas elementos sutiles del clima”. Clima viene ser la combinación de varios elementos meteorológicos tomados en un cierto espacio y tiempo.

Es difícil hablar del Clima y no relacionarlo inmediatamente con cambio climático, calentamiento global y por supuesto sus implicaciones en el medio ambiente y en el desarrollo sostenible. Pero este trascendente apartado no es tema a tratar en nuestra intervención.

Todas las facetas de nuestra vida están relacionadas directa o indirectamente con el Clima y lo que es más importante, cada vez será mayor su interrelación, si es que no lo es ya. Esta influencia sin duda nos hará cambiar todas nuestras formas y maneras de vida; pero no hay porqué preocuparse, la historia del hombre a lo largo de los tiempos nos dice que la humanidad se ha ido adaptando a las circunstancias ambientales por adversas que estas hayan sido.



Fotografía de la Isla de Tenerife con el Teide al fondo, tomada el 03/06/2005 a las 14h 18 minutos

*Como veremos mas adelante, el Clima está caracterizado y claramente fundamentado en el **Sistema Climático Mundial (SCM,)** clave no solo en la catalogación del propio Clima, sino en el llamado "Clima Futuro" y aquí debemos de hacer especial énfasis en el citado SCM, del que todavía desconocemos algunos de sus procesos internos y en los que deberíamos de profundizar más para hacer una precisa y concisa diagnosis de lo que está pasando y el porqué, sobre todo para realizar unas prognosis acertada y no aproximada.*

Concepto de clima

En esencia se puede decir Meteorología y Climatología "manipulan" sobre materia prima común pero la elaboran de forma distinta, es decir utilizan distinta metodología.

La METEOROLOGÍA en sí, no agota el estudio de la atmósfera que tiene dos aspectos y que se concentran en los términos TIEMPO Y CLIMA.

TIEMPO es el "elemento activo y cambiante de la acción de la atmósfera", CLIMA es lo que tiene de permanente El TIEMPO. Y hoy día todavía existe confusión en el manejo de ambas palabras, cuando se suele "hablar de que la climatología de hoy es que está lloviendo.....", cuando realmente habría que hablar de que " el tiempo de hoy es... " ó incluso las condiciones atmosféricas.

De las muchas definiciones de la palabra CLIMA, extraemos la que sigue del vocabulario meteorológico internacional de la OMM.

“Síntesis de las condiciones meteorológicas en una zona determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.) de los elementos (variables) meteorológicos”.

La Climatología es el estudio del estado físico de la atmósfera y de sus variaciones estadísticas en el espacio y en el tiempo, tal como se reflejan en el comportamiento meteorológico en un período de muchos años.

El Clima así definido, queda caracterizado por :

- Los valores estadísticos de los distintos elementos climáticos. Es lo que se llama **CLIMATOLOGÍA ESTADÍSTICA**.
- Los estados y la evolución del tiempo, tal y como se manifiestan en los mapas del tiempo o sinópticos. Es la **CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA**. *Rama de la climatografía (descripción cuantitativa del clima que se basa en mapas, gráficos, diagramas, textos que presentan los valores característicos de los elementos climáticos de una zona o región) que describe los climas basándose en los tipos sinópticos.* Es el estudio de los climas basado sobre los procesos de la *Circulación General de la Atmósfera (CGA) o procesos sinópticos.*

(sinóptico: “syn” junto con, “optic” visto o mirado)

Añadiremos otro concepto de interés relacionado con nuestro tema; se trata de lo que se denomina

CLIMATOLOGÍA DINÁMICA,

“Recopilación y estudio estadístico de los elementos observados (o parámetros derivados), en particular para interpretar o explicar, en términos físicos y dinámicos, las características actuales del clima, con sus fluctuaciones anómalas y los cambios o las tendencias a largo plazo”

o “Estudio de los movimientos significativos de la atmósfera y de los procesos y características atmosféricas que producen tales movimientos”

A los efectos de tener una mejor imagen real del clima de un lugar o país, deberíamos de sustituir las engorrosas estadísticas por descripciones que tengan en cuenta aspectos mas comprensibles, como los aspectos geográficos e incluso el paisaje que de cierta manera y en especial, mediante la vegetación espontánea, que constituye la expresión mas “plástica” del clima.

Clima y periodo de referencia

También se necesita concretar el período de tiempo requerido para que las características que deduzcamos para definir el clima, pueda considerarse como representativos del clima del área geográfica en cuestión, lo que sin duda exige en cierto modo una grado aceptable de “constancia” en el clima así definido.

En latitudes templadas, se acordó *un período de 30 años como período de referencia* y efectivamente, hasta hace poco parecía que el mencionado podía servir y que se apoyaba en una buena base científica.

Las primeras series largas de observaciones meteorológicas con instrumentos, mostraban que el clima de finales del S. XIX y principios del S. XX era muy parecido al correspondiente a los 100 años anteriores, cuando se iniciaron las citadas observaciones.

En nuestro caso, y en la Península Ibérica según FONT, se ha visto como desde 1956 únicamente hubo cinco años sin fenómenos climáticos adversos que hicieran acreedores de ser reflejados en la prensa: 1969, 1976, 1978, 1987 y 1991. La variabilidad ha aumentado a partir de 1981 de forma significativa.

Todo esto nos hace pensar que la supuesta “constancia” del clima no pasa de ser una entelequia. Esto indica que el período de referencia elegido de 30 años puede cambiar y se encuentran ciertas diferencias según el período que se elija, 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990 y ahora suele tomarse 1971-2000 para reflejar de forma más concreta las variaciones de estos años; incluso se alarga el final del período hasta 2006 para tener en cuenta la gran cantidad de anomalías climáticas registradas entre el 2000 y el 2006.

Como orientación veamos a continuación los años necesarios por zonas que se precisan para obtener, desde el punto de vista estadístico, una distribución estable de frecuencias de los diferentes elementos/variables meteorológicas.

Tabla 1.

Elemento climático	Islas	Costas	Llanuras	Montañas
	EXTRATROPICOS	EXTRATROPICOS	EXTRATROPICOS	EXTRATROPICOS
Temperatura	10	15	15	25
Humedad	3	6	5	10
Nubosidad	4	4	8	12
Visibilidad	5	5	5	8
Precipitación	25	30	40	50
	TROPICALES	TROPICALES	TROPICALES	TROPICALES
Temperatura	5	8	10	15
Humedad	1	2	3	6
Nubosidad	2	3	4	6
Visibilidad	3	3	4	6
Precipitación	30	40	40	50

Factores climáticos

Son ciertas condiciones físicas (diferentes de los elementos climáticos) que influyen generalmente sobre el clima (latitud, altitud, distribución de tierras y mares, topografía, corrientes oceánicas, etc.).

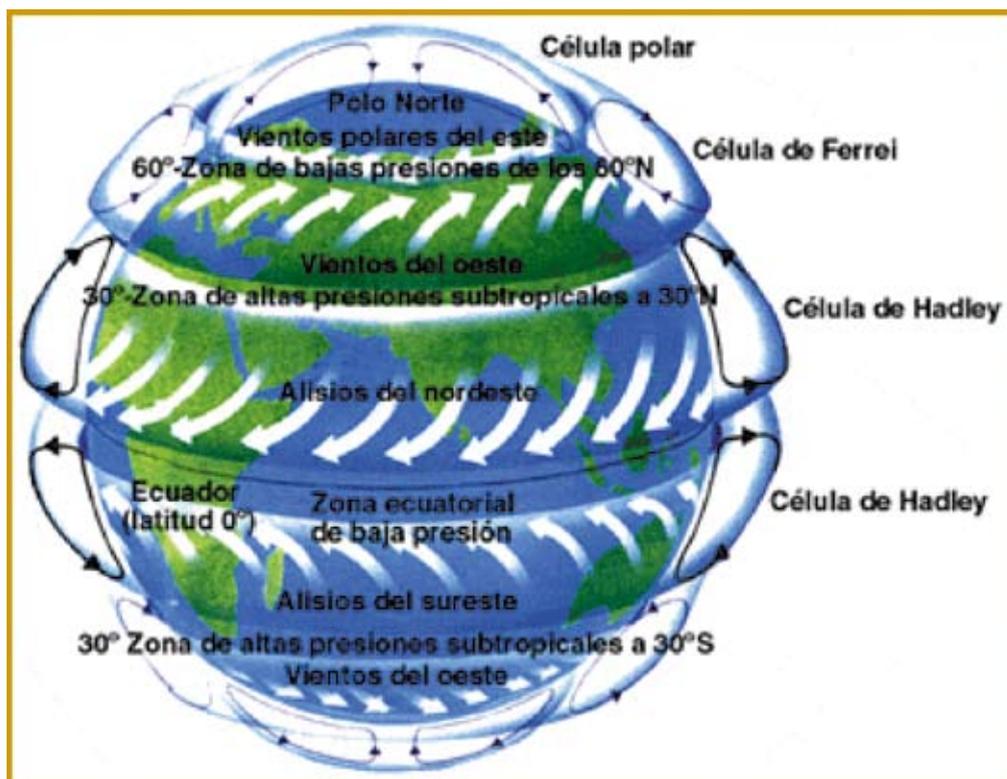
Hay factores fundamentales y secundarios o complementarios. Entre los primeros citaremos a :

1. Circulación General de la Atmósfera (CGA).
2. Situación y configuración geográfica / continentalidad
3. Accidentes orográficos
4. Influencia marina

Existe una fuerte interrelación (interacción océano-atmósfera) entre los factores 1 y 4 (que son variables). A este respecto, recordemos sin ir más lejos el Fenómeno de El Niño. Los 2 y 3 son constantes en el tiempo, e influyen en el 1 como es conocido de todos.

Los factores secundarios o complementarios de los anteriores serían:

1. Altitud del lugar
2. Exposición a la Radiación Solar
3. Naturaleza superficie (vegetación, tipo de suelo, ríos, lagos, etc.)



Esquema de la circulación general. Células de HADLEY Y FERREL

3.1 Factores fundamentales. Circulación general de la atmósfera (CGA)

La circulación general es el conjunto de las corrientes de la atmósfera sobre el globo terrestre. Con frecuencia el término se aplica a la configuración de la corriente media en un intervalo de tiempo dado.

La atmósfera en realidad es semejante a una inmensa máquina térmica en la que la clave está en la diferencia térmica entre los Polos y Ecuador, lo que proporciona la suficiente energía para poner en marcha la CGA. La energía se va transformando en sus diferentes formas (Energía cinética, potencial, procedente de los cambios de estado, etc.). Los movimientos horizontales predominan claramente sobre los verticales (centenares de veces mayores los horizontales) y favorecido en general por un predominio de la estabilidad atmosférica por término medio.

Los principios físicos básicos de la conservación del momento y la energía, de la masa y de las distintas leyes de la radiación y demás procesos dinámicos y termodinámicos, se aplican a la atmósfera.

Se puede decir que la CGA es el resultado "dinámico" de la interacción del Sol (térmica), y la rotación terrestre que se refleja en el movimientos de las masas de la aire alrededor de la Tierra desde el suelo hasta los niveles mas altos de la atmósfera y que incluye también la circulación oceánica como enorme termorregulador del planeta, que transporta calor, masas de agua a través de corrientes marinas, etc.,.

Este sencillo esquema de circulación planteamos, los vientos en superficie siempre soplarían del norte en el hemisferio boreal y del sur en el otro. Los movimientos del aire día a día no tienen fácil representación y si es posible hacerlo tomando la media de varios días cuando es factible establecer un esquema de movimiento mas ordenado.

Los primeros intentos de explicar la circulación general de la atmósfera (CGA) se basó en las observaciones de los marinos que navegaban por los mares del mundo y fue EDMUND HALLEY EN 1686 quien inició el estudio de la relación entre estas observaciones y la distribución de la radiación solar que llegaba a la Tierra. El rasgo dominante mas observado fueron los "*ali sios*" que *soplaban cerca del Ecuador*, del NE y SE, respectivamente en el Hemisferio norte y sur, donde se debilitaban, dando lugar a la zona de "*las calmas ecuatoriales*". Allí por efecto de la convección ascendían formando bajas presiones, por lo que entre los alisios, predominaban las mencionadas bajas. HALLEY sugirió que los vientos alisios eran la compensación de las ascendencias ecuatoriales.

Pero no explicaba porque las direcciones NE y SE y no de Norte o Sur y este hecho, como se conoce, era debido al efecto Coriolis. (fuerza resultante de la rotación terrestre).

Teniendo en cuenta estos factores de diferencias térmicas y las correspondientes de presión propuso un sencillo esquema de circulación entre los Polos y el Ecuador, modificado por FERREL y JORGE HADLEY que se observa en el gráfico. El citado HADLEY EN 1735 explico el efecto Coriolis en los vientos del Norte y Sur para que fuesen de hecho del NE o SE, haciendo intervenir la rotación terrestre.

A partir de esta fecha se matizaron mas estos detalles de la circulación hasta llegar a uno menos sencillo, con el aire ascendente desde el Ecuador que no llega a los polos, sino que a los 30º de latitud vuelve a descender a medida que se va enfriando cuando se dirige hacia el norte

Se observan tres áreas importantes de viento, la zona de los alisios (nordestes) entre el Ecuador y los 30º, de los sudoestes (SW) entre 30 y 60º y de nuevo vientos del NE en la zona polar.

Entre estas zonas, existen zonas de vientos variables o en calmas donde predominan los movimientos verticales (zonas de máxima convección), concretamente en el Ecuador. No ocurre lo mismo sobre los 30º donde divergen los SW y los NE al nivel del suelo y convergen en niveles altos, dando lugar a corrientes descendentes y por ende zonas anticiclónicas y que se corresponden con la presencia, por ejemplo, de las altas presiones de Azores y otros centros anticiclónicos similares.

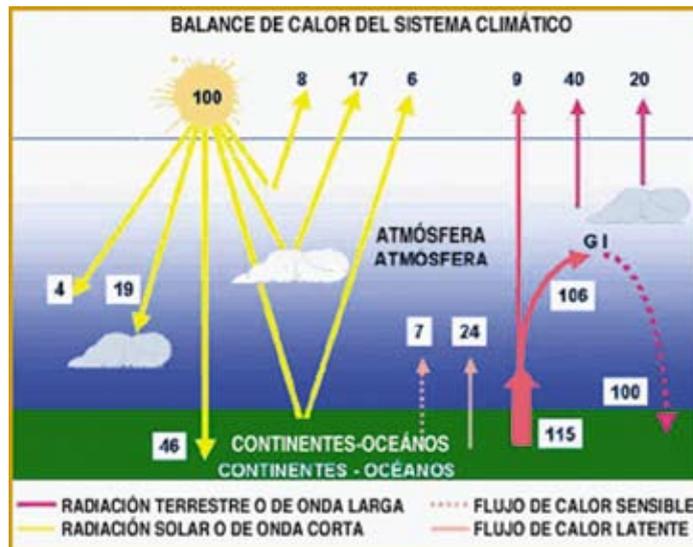
Sobre los 60º, se marca una superficie de discontinuidad entre las masas de aire subtropical (cálida) y polar (fría), lo que da lugar al llamado frente polar, que resulta de la intersección de la superficie de discontinuidad con el suelo. Las masas cálidas ascienden sobre la masa fría y se forman los frentes nubosos.

Las posiciones antes mencionadas no son estacionarias, sino que experimentan variaciones cíclicas anuales según la estación del año, bien hacia el norte (verano), bien hacia el sur (invierno), especialmente entre los 30 y los 40º. Solo en el Ecuador reinan las mismas condiciones en verano y en invierno. Esto es decisivo para determinar las zonas climáticas de la Tierra. El ciclo anual cíclico de las condiciones climáticas es clave entre los 30º y los 40º, donde en verano y en el Hemisferio norte, predominan las altas presiones y a veces da lugar a tipos de tiempo con sequías y climas áridos. En invierno y en el mismo hemisferio, el movimiento hacia el sur da a lugar en estas zonas habitualmente a tiempo revuelto e inestable por el acercamiento de las borrascas atlánticas asociadas al frente polar.

Balance de radiación y sistema climático mundial

Por término medio, el 46% aprox. de la radiación solar que llega a la atmósfera exterior es absorbida por la superficie y solo el 22% de la radiación de onda corta lo absorbe la citada atmósfera, por lo que es muy transparente para este tipo de onda. La energía se absorbe en forma de calor por continentes en pocos centímetros de suelo y por las aguas oceánicas en varios metros, transportando el calor hacia el fondo y hasta apreciables profundidades. En los primeros la variación diurna es grande y en los océanos es muy pequeña. Para elevar 1ºC la temperatura de cierta cantidad de agua se necesita 3 o 4 veces más energía que la correspondiente también en 1ºC la misma cantidad de masa de suelo. Pero la absorción por parte de la superficie terrestre, depende de la naturaleza del suelo por lo que igualmente se calienta de distinta manera. En verano, los continentes son fuentes de calor, los océanos sumideros.

De los tres procesos a través de los que se trasfiere calor, conducción, radiación y convección, el mas importante este último, que se realiza a través de desplazamientos de las moléculas por diferencia de presión. Es una manera por la que se pone el aire en movimiento a través de un fluido. (Gases, líquidos; atmósfera, agua) y a través fundamentalmente de la atmósfera entre sus distintas capas.

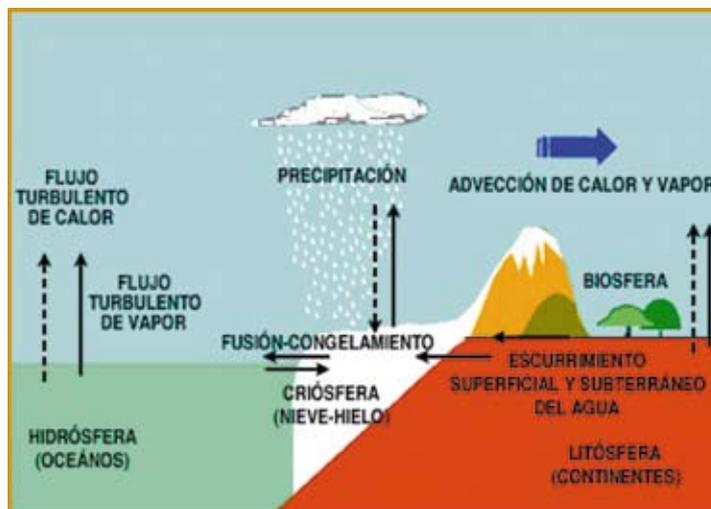


Pérdidas de Calor por absorción, reflexión y dispersión

Fuente : Strahler, 1984

Las corrientes de convección se desarrollan en la atmósfera y pueden transferir calor de forma relativamente rápida, desde el suelo hasta los niveles superiores, obligado por aire más frío que viene de latitudes más altas, que lo sustituye (ya comentado en el esquema de la circulación).

Puede también establecerse corrientes o circulaciones aéreas entre zonas continentales y oceánicas, dado que por diferencia de temperaturas se establecen diferencias de presión. El aire frío se desplaza hacia el cálido, donde menor presión existe. Evidentemente, también en el océano se establecen corrientes de convección por diferencias térmicas. La circulación atmosférica depende entre otras cosas de las diferencias de presión, por el desigual calentamiento de tierras y mares, lo que se traduce en un esquema demasiado sencillo de circulación.



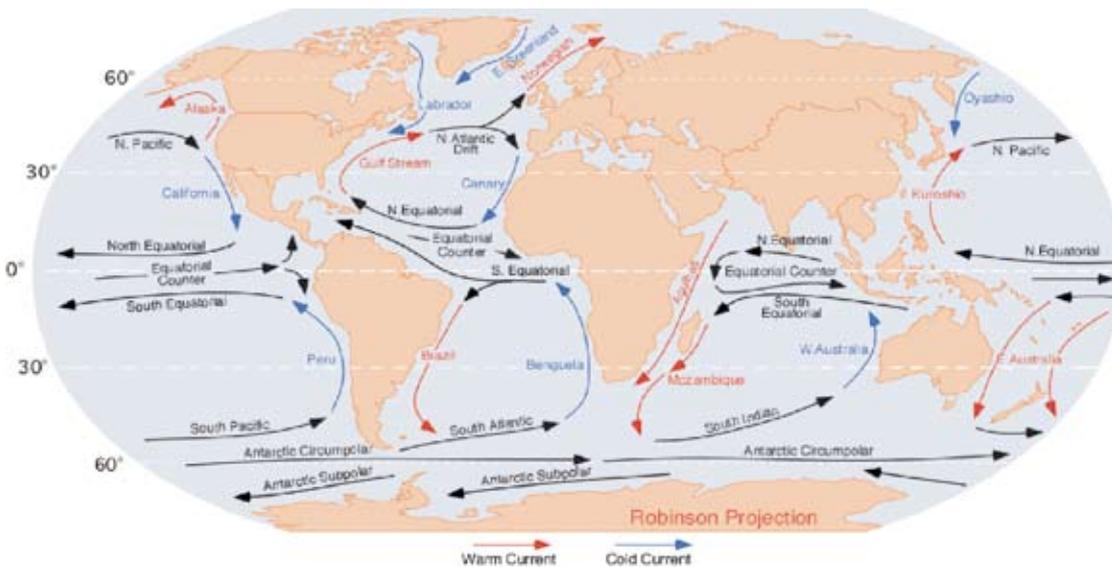
Componentes del Sistema Climático Mundial

Esta formado por la atmósfera, la hidrosfera (comprendidas el agua líquida que se encuentra sobre la superficie terrestre o por debajo; la criosfera, esto es, la nieve y el hielo por encima y por debajo de la superficie), la litosfera superficial (que comprende las rocas, el suelo y los sedimentos de la superficie terrestre) y la biosfera (que comprende la vida vegetal y animal en la Tierra, así como el hombre), las cuales bajo los efectos de la radiación solar recibida por la Tierra, determinan el clima de la Tierra. Aunque el clima sólo se relaciona fundamentalmente con los estados variados de la atmósfera, las otras partes del sistema climático también ejercen una función significativa en la formación del clima, a través de sus interacciones con la atmósfera.

Estos elementos que constituyen el SC son interactivos y abiertos y no aislados en cuanto a la energía, dado que reciben la energía solar a través del espacio pero son aislados en cuanto a materia. Están interrelacionados a través de complejos procesos físico-químicos que incluyen flujos de energía y materia a través de sus límites. Estos componentes del SC son heterogéneos desde el punto de vista termodinámico y se caracterizan por su composición química y su estado termodinámico y mecánico (Peixoto, 1989).

Para un mejor conocimiento es necesario parametrizar en tres dimensiones variables con la atmósfera, presión, etc. Para el océano, temperatura, salinidad, CO₂, corrientes marinas, etc y en la litosfera temperatura, humedad, albedo, textura o capacidad calorífica. La parametrización en cuestión es muy compleja. Todos estos parámetros, aplicados a espacios pequeños y supuestamente homogéneos, nos darían innumerables posibles estados que deben de tratarse estadísticamente. Con este planteamiento estadístico de posibles estados del SC, se propone una definición del Clima "como el conjunto estadístico de estados del sistema atmósfera-océano-suelo durante un período de varias décadas" (A.S.Monin).

Digamos que el clima, es un estado característica de este sistema, determinado por los valores de un conjunto de variables o elementos meteorológicos.



Dr.Michael Pidwvirny Corrientes mundiales oceánicas superficiales, rojo cálidas, azules frías. y, University, British Columbia Okanagan

Dr.Michael Pidwvirny Corrientes mundiales oceánicas superficiales, rojo cálidas, azules frías y, University, British Columbia Okanagan

Circulación general y sistema climático mundial. Circulación oceánica

El sistema climático mundial se alimenta de la energía solar, que recae en su mayor parte sobre las latitudes bajas. A lo largo del año, el ecuador recibe aproximadamente cinco veces más calor que los polos, creando una diferencia de temperatura entre ambos. La circulación de la atmósfera y del océano responden a este gradiente horizontal de temperaturas transportando calor del ecuador a los polos. De hecho, el sistema climático es en cierto sentido un motor cuya fuente de calor está situado en el ecuador y que tiene su disipador de temperaturas en las regiones polares.

Tanto la atmósfera como el océano desempeñan un papel decisivo en la transferencia de calor hacia los polos; un 60% del total lo transporta la atmósfera y el 40% restante los océanos. En la baja atmósfera el calor se transporta mediante las bajas presiones y por el flujo predominante. Las bajas presiones en su sector oriental transportan calor hacia los polos y aire frío hacia el ecuador en su parte occidental. La atmósfera puede responder de forma relativamente rápida a las variaciones de la tasa de calentamiento en latitudes bajas o altas, de tal forma que las trayectorias de las borrascas y el flujo predominante varían en una escala que varía de días a años.

En los océanos las variaciones responden a escala más grande. La diferente distribución de tierras y mares en ambos hemisferios influye de forma importante en la circulación atmosférica y oceánica, cuyos flujos son más zonales (dirección oeste en general) en el hemisferio sur que en el norte, donde predominan los continentes. De ahí que en el hemisferio sur predomine el transporte atmosférico sobre el oceánico, mientras al norte del ecuador el transporte a través de los océanos predomina entre el ecuador y los 17°N.

El valor máximo se sitúa en torno a los 35° en ambos hemisferios. A estas latitudes, el componente atmosférico equivale aproximadamente a un 78% del total en el hemisferio norte, y un 92% en el hemisferio sur.

Una consecuencia más de esa diferencia entre las condiciones terrestres y oceánicas en ambos hemisferios es el hecho de que la *diferencia de temperatura entre el ecuador y el polo es casi un 40%* mayor en el sur que en el norte y genera vientos del oeste más intensos en latitudes medias.

El transporte de calor atmosférico hacia los polos es máximo durante el invierno, en que las pérdidas de calor son elevadas en latitudes altas, y en que la diferencia de temperaturas entre las latitudes ecuatoriales y tropicales es máxima.

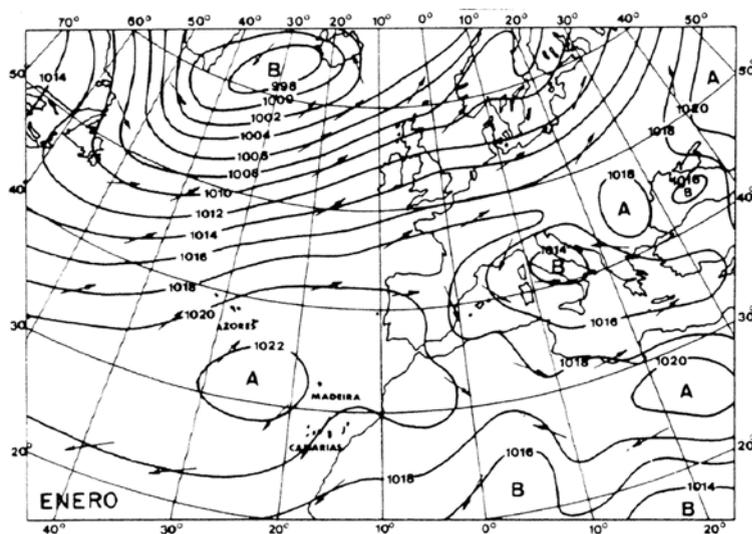
Circulación general en nuestras latitudes. Orografía y continentalidad. Efectos distribución tierras y mares

La circulación general atmosférica en realidad es más complicada cuando se considera por ejemplo la distribución de tierras y mares, la distinta forma de absorción y conducción del mismo de calor entre tierra y océanos y la presencia de los diferentes sistemas orográficos más importantes. Diferente oscilación diurna y anual entre tierras y mares y desviaciones de las corrientes aéreas por la presencia de las principales orografías de la Tierra.

Tomando como punto de partida todo lo comentado anteriormente y para conocer con un poco más de detalle como es la circulación general en superficie en las proximidades de la Península en nuestras

latitudes, y sobre todo adentrarnos una de las claves mas importantes para conocer el clima peninsular. Veamos estos dos mapas que se presentan a continuación. Se trata de la distribución media de la presión y dirección de los vientos dominantes en superficie en los meses de julio y enero sobre una zona en la que se incluye la Península.

Se observan sistemas de alta y baja presión que responden a los puntos de vista que hemos abordado anteriormente. Destacan los centros de presión "dinámicos" (Alta de Azores y Depresión de



Situación promedio del campo de presiones durante el mes de enero (mapas hemisféricos, Gommel)

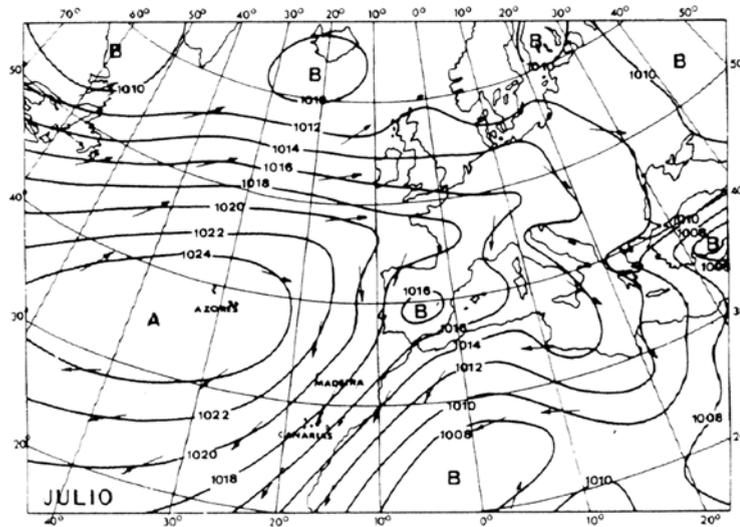
Islandia) y los centros térmicos directamente relacionados con la continentalidad y estacionalidad. Las bajas térmicas aparecen en el interior de los continentes en verano y es poco habitual que tenga reflejo en capas altas. El anticiclón de Siberia y otros de naturaleza térmica que aparece normalmente en invierno en la zona en cuestión y apenas tiene reflejo en capas medias o altas. No es el caso de los sistemas de presión dinámicos, llamados así por su constitución y su "gran fortaleza" debido a su extensión en la vertical. Dinámico no equivale a movimiento tal y como lo entendemos. Responde a movimientos relacionados con su formación desde el punto de vista dinámico.

A estos anticiclones (o depresiones), como el de Azores o la depresión de Islandia se les denomina también *"semipermanentes"*, *dado que suelen predominar bien las altas, bien las bajas presiones, durante una gran parte del año y sobre la que en los mapas de la presión media mensual aparece un centro de alta o un centro de baja*. Hay otros centros similares como el de las Bermudas, del Atlántico norte o sur e igualmente el de Siberia, ya comentado.

El alta de Azores, es la esencia de los anticiclones subtropicales que se vislumbran en el esquema de la circulación general y es clave, entre otros, en el clima del Cantábrico. Podemos decir que entre el citado, el anticiclón siberiano, la depresión sahariana y la de Islandia, esta el "quid" de la cuestión sobre las características climáticas de la Península Ibérica., unida a sus especiales características de "mini

continente”, con sistemas orográficos de lo mas variado, rodeado de tres mares/océanos distintos e influenciado por la corriente cálida del Golfo, aguas con temperaturas superiores a las que corresponderían por latitud. La mencionada corriente, se coloca alrededor de los 45º de latitud en verano y sobre los 50º en invierno y una desviación penetra a lo largo de todo el año hasta el Golfo de Vizcaya.

Si nos fijamos con mas detalle en la circulación en las proximidades de la Península y partiendo del estudio realizado en la nota técnica del INM realizada por el Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima (MMA), de título *“Metodología para una caracterización de la circulación atmosférica de la Península Ibérica y Baleares”*, se *observan una serie de situaciones sinópticas tipo*, una vez analizadas situación en superficie y en el nivel de 500 mb (hPa) entre 1946 y 1989. La metodología del trabajo no es objeto en este momento y nos remitimos a su lectura, si bien comentar que se han analizado mas de 14.000 situaciones. En otra Nota Técnica, la nº 10 se añade al estudio de estas situaciones la de verificar si se han observado cambios o tendencias en las frecuencias de aparición de los tipos sinópticos de referencia en la circulación en un período determinado, y cuyo estudio se recomienda.



Situación promedio del campo de presiones durante el mes de julio (mapas hemisféricos, Gommel)

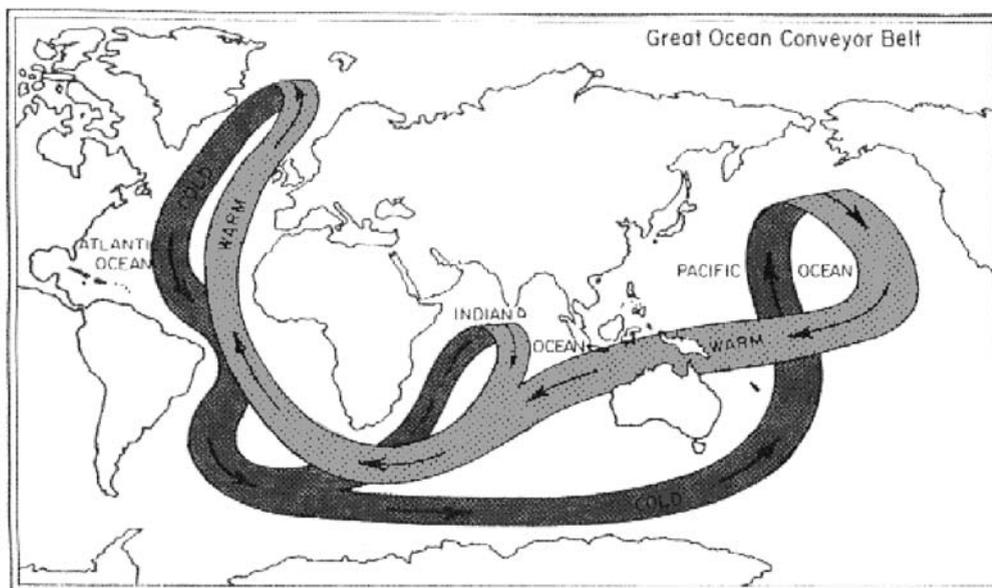
Este estudio demuestra que se han encontrado una serie de situaciones típicas en diferentes épocas del año, invierno (diciembre, enero, febrero), primavera (marzo, abril, mayo), verano (junio, junio, agosto) y otoño (septiembre, octubre, noviembre) con algunas variaciones o desviaciones de las citadas.

Conexión con latitudes inferiores

Las regiones polares están conectadas con el resto del SACM. mediante trayectorias complejas tanto de flujo atmosférico como de flujo oceánico. En las capas altas oceánicas la circulación varía en plazos de meses o años, pero en las aguas profundas o capas bajas, la circulación termohalina (cinta transportadora oceánica o circulación oceánica profunda) tarda de decenios a siglos en cambiar. Esta circulación es el vínculo entre las latitudes altas y el resto del sistema tierra y además relaciona el Ártico y el Antártico, y

se fundamenta en la diferencia de temperaturas y de salinidad. Estas masas de agua, cálidas en principio, cuando se dirigen hacia el norte se enfrían y descienden a mayor profundidad, no solo transportan energía calorífica, sino también materia, sustancias sólidas, disueltas y gases por todo el planeta, lo que influye de forma notable en el clima de la Tierra.

Las aguas frías afloran en el fondo marino casi en su totalidad en el Océano Antártico, pero las más antiguas (con tiempo de desplazamiento de 1.600 años), afloran en el Océano Pacífico. Se produce, pues, una mezcla a gran escala en las cuencas oceánicas que reduce la diferencia térmica entre ellas y que convierte el océano en **un sistema global**. Esto nos indica que las conexiones más inmediatas entre bajas y altas latitudes se realiza a través de la atmósfera.



"Cinta transportadora" oceánica. Corrientes cálidas (rojo) superficiales, corrientes frías (azul) profundas. También llamada circulación termohalina. Agua de alta salinidad se enfría y se hunde en el Atlántico norte, dando lugar a una capa superficial compensatoria hacia el norte de agua mas caliente y de alta salinidad. (Broecker, 1991)

Masas de aire sobre la península clasificación

Cuando una masa de aire se estaciona varias fechas sobre una gran región uniforme, adquiere unas características que dependen de la superficie sobre la que se coloca. Si el aire es mas frío que el suelo, el calor se trasfiere a las capas altas, incluso varios kms. Si la masa se coloca sobre el océano, la humedad iría ocupando las capas de la masa que tiene encima. Así que temperatura y humedad del aire tienen a equilibrarse con la superficie subyacente. De esta forma, si el aire adquiere propiedades similares y uniformes en una gran extensión, se le llama **masa de aire**. Pero para ello es necesario que la masa se estacione durante cierto número de días en una gran extensión.

De esta manera, la humedad y la temperatura tienen, aproximadamente, los mismos valores sobre extensas distancias horizontales. Existen zonas de la Tierra generadoras de masas de aire donde se sitúan centros de presión casi estacionarios, el cinturón de altas presiones subtropicales y los anticiclones polares. Pero a veces, el aire puede establecerse durante largos períodos tiempo en otras regiones, por ejemplo las altas continentales en invierno, a veces en Centro Europa o en Siberia o Canadá, que serían los polares.

La circulación general presenta ondulaciones o "meandros" en nuestras latitudes, bien hacia el Ecuador (*masas de aire tropicales, pero puede proceder de regiones subtropicales*), bien hacia el Polo (*masas de aire polar, pero puede ser de origen subtropical*). La separación entre ambas suele denominarse "frente polar". Esto es así en la media y alta troposfera, no así cerca del suelo, donde el tema se complica por los conocidos efectos de la orografía. (rozamiento).

El problema viene de dos causas, bien porque la circulación es mucho mas complicada y pueden formarse de forma temporal masas o frentes efímeros, bien porque tanto continentes como océanos transfieren propiedades muy diferentes al aire que soportan. En resumen, pueden encontrarse masas o frentes en superficie que en que en niveles altos no se reflejan.

Pueden clasificarse las masas de aire en función de las regiones "generadoras" donde se producen, pero esto solo debe aplicarse a su historia reciente. Algunos meteorólogos las clasifican para la *baja troposfera* basándose *en la región o latitud que las genera, siendo la temperatura la variable mas influenciado por la latitud* :

- Aire ecuatorial
- Aire tropical (T), *relativamente cálidas*
- Aire Polar (P), *relativamente frías*
- Aire antártico o ártico. (A) *muy frías y secas*

No es fácil distinguir las dos primeras desde el punto de vista térmico por su zona de procedencia. Por contra, las masas polar/antártico son muy frías y secas (suelen tener escaso contenido de vapor de agua) y a veces, pueden encontrarse frentes entre las dos últimas.

Otra clasificación tiene en cuenta la humedad. Las masas de aire oceánicas, con mayor contenido de vapor de agua, se les denomina *masas de aire marítimo, (masas húmedas)* en tanto que las que se ubican sobre los continentes son llamadas *masas de aire continentales, (masas secas)*.

En consecuencia podemos combinar ambos conceptos, en función de su procedencia y si son o no oceánicas o continentales, y teniendo en cuenta únicamente la temperatura y la humedad:

Tropical marítimo Tm

Tropical continental Tc

Polar marítimo Pm

Polar continental Pc

Pero las masas de aire cuando dejan su zona de origen y se desplazan sobre otras zonas, se modifican, por ejemplo, una masa fría al moverse sobre suelo mas cálido se calienta desde el suelo y a la vez se inestabiliza. Una masa cálida si se mueve sobre suelo mas frío, pierde calor.

En resumen, cambian su gradiente vertical de temperaturas y cambia su estabilidad.

Esto nos obliga a una nueva subdivisión y nuevos símbolos, de tal forma que aire más frío que la superficie sobre la que se mueve, (*K*) y aire más cálido que la superficie sobre la que se mueve (*W*), con lo que tenemos los siguientes: *TmK, TmW, TcK, TcW, PmK, PmW, PcK, PcW*.

Los símbolos *K* y *W* se refieren a diferencias de temperatura entre el aire y la superficie sobre la que se mueve. Su evolución da lugar a diferentes fenómenos meteorológicos.

Tabla 2. Tipos de masas más frecuentes que afectan a la Península Ibérica

Tipo de masa	Procedencia	Símbolos	Época del año
Masas frías marítimas	Groenlandia, Norte de Canadá, Océano Ártico Atlántico Norte (del N o NW)	Pm y Am	Especialmente en invierno y en ocasiones en Abril. Puede dar lugar a nevadas en cotas bajas en el Cantábrico.
Masas frías continentales	Rusia y Libia (De Centroeuro-ropa, de Rusia, de Siberia)	Pc	Invierno, especialmente enero o febrero, donde en ocasiones puede nevar en zonas costeras del Cantábrico o en todo caso, fríos intensos y cielos despejados, en función de la situación capas altas.
Masas cálidas marítimas	Atlántico subtropical y tropical, Mediterráneo (del W, SW o del SE, en el caso de mediterránea)	Tm y Masa de aire mediterránea	Generalmente en verano. No se descartan en otoño, primavera, e invierno, donde suelen darse temperaturas altas en las costas del Cantábrico. Masa mediterránea, en otoño y en el Levante español.
Masa cálida continental	Norte de África	Tc	En general en verano, pero puede darse en cualquier época, al menos en los últimos años.

Las masas de aire más frecuentes que visitan la Península son las *Tm* y *Pm*. Son masas arrastradas por las depresiones atlánticas y sus frentes nubosos asociados, con ondulaciones cálidas y frías (*Tm, Pm*) que entran en "juego" con el anticiclón subtropical de Azores y como se puede comprobar en los mapas medios de enero y julio descritos más arriba. (menos frecuentes, *Pc* y *Am*)

Por término medio, se podría decir que la menos frecuente es la *Tc*, pero en los últimos años afecta a la Península con relativa frecuencia en cualquier época del año. Lo normal es que sea más frecuente en verano, pero si se dan otra serie de circunstancias, la masa de aire cálido africano refuerza las bajas

debajo de 10/15 se puede hablar de oceánico y por *encima-(en general)- de 20 el clima* es continental y se extiende por la mayor parte de la Península, con las matizaciones de "continental extremo" en la Meseta Sur, Alto Guadalquivir y zona central de la Depresión del Ebro. Por encima de 30, el carácter es continental extremo.

En líneas generales y para la Península hay una estrecha franja costera que se extiende desde Irán hasta Cabo San Vicente y se ensancha precisamente en Asturias, Galicia y quizás Cantabria, *con marcado clima oceánico* (lluvioso). Similares condiciones encontramos en la costa del Estrecho. (valores inferiores a 15, junto con algunas comarcas costeras mediterráneas.

$$\text{F.Kerner } M = 100 \frac{t_0 - t_a}{A} \text{ índice de oceanidad}$$

(t_a temperatura media del mes de abril t_0 temperatura media del mes de octubre)

Por ejemplo, La Mancha $K = 35$, $M = 8$ y cabos de la costa atlántica $K = -2$ $M = 50$

Cualquiera de estos índices sencillos, se pueden consultar en cualquier publicación que verse sobre Clima o Climatología. (K y M se contraponen).

Índices de evaporatividad / Índices hídricos. Evaporación Potencial.

La humedad es clave en la atmósfera en los procesos físicos y dinámicos del aire y en consecuencia el vapor de agua que enriquece el contenido del aire de la citada. La evaporación es función de la naturaleza de la cantidad de superficie evaporante, de las condiciones o características de la citada, tipo de suelo, etc. y en buena lógica de las condiciones atmosféricas reinantes. Incorporar la variable evaporación en los modelos numéricos es muy complejo y presenta numerosas complicaciones y medirla tampoco es sencillo.

Suele recurrirse a alguna definición más o menos sencilla como es la evaporación potencial, *cantidad máxima de agua que podría evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal bien dotada de agua. Incluye la evaporación del suelo y la transpiración por la vegetación en un intervalo de tiempo dado y en una región determinada. Se expresa en cm. De altura de agua.* Si hablamos de *evaporación efectiva, el concepto es contrario a la potencial.* La efectiva es máxima en el mar y nula en zonas desérticas, donde es máxima la potencial. La medida de la evaporación (potencial) se realizan en los "tanques evaporimétricos" instalados no hace mucho tiempo y con series poco largas y de ahí que se utilice una medida mas directa y algo menos representativa. También se utiliza una forma de medida mas elemental, con es la resultante del evaporímetro Piché, medida directa de la evaporación de la garita, donde coexiste con los termómetros de máxima, mínima, medidas de humedad, etc. De este aparato sí se disponen de medidas, pero son aproximadas, si bien pueden utilizarse como referencia.

Hay medidas de la evaporación potencial basadas en otras variables como insolación, temperatura, velocidad del viento etc., valores obtenidos de un período suficientemente largo. destacando los trabajos de PENNMAN. Esta fórmula responde bastante bien a las necesidades de este tipo de variable.

Otra opción es la fórmula de THORNTTHWAITE, fórmula demasiado complicada con varias constantes numéricas y con la única medida requerida de la temperatura del aire. Las constantes son obtenidas de forma experimental, diferentes para cada zona.

Clasificación de los climas

Hace 2.500 años los filósofos griegos intentaron explicar las diferencias climáticas entre unas y otras regiones, usando simplemente la geometría del Sol y de la Tierra. En realidad, clima significa *“inclinación”*, relacionado con la caída de los rayos solares. del año. Observaron que con el sol *“bajo”* (invierno), hacía mas frío en el norte y en zonas con el sol *“alto”* (verano) hacia mas caloren el sur de Grecia. Hicieron observaciones cuidadosas de la altura del sol en estos lugares, los días mas cortos y los mas largos del año, encontrando una buena explicación cuando decían que la latitud jugaba un papel importantes en el clima. También de hablaba de la *“zona tórrida”* situada entre los trópicos, es decir los límites donde el sol está directamente encima del lugar en una u otra época.

Seguro que esto mismo pensaban otros eruditos en otras partes del mundo, pero ninguno de ellos se benefició de las experiencias y observaciones efectuadas por otros, distantes muchos km unos de otros y no disponían por tanto, de medios para conocer la variedad climática existente en el mundo.

Hablaban también de la *“zona polar”* que se extendía hacia los polos a partir de cada uno de los círculos de latitud 66,5º. Entre ambas, estaba la *“zona templada”*. *Esta clasificación se hizo hace 2.500 años, por lo que resulta sorprendente su precisión.*

Los climatólogos utilizan tres criterios para la clasificación:

- Procesos atmosféricos que forman el clima (*Clasificación genética*)
- Relación entre clima y distribución de vegetación (*Clasificación empírica*)
- Balance hidrológico (*Clasificación hidrológica*)

La primera *“busca”* las causas (génesis). Por ejemplo, un clima podría ser de alisio, porque la causa fundamental de su clima se basa en el hecho de la zona en cuestión está sometida a la influencia de los alisios de la CGA. (Canarias).

La segunda se basa en la relación estrecha entre clima y vegetación; un clima puede decirse que es *“desértico”* o de *“tundra”* según la vegetación que se encuentra en sus límites (desiertos).

La tercera se basa en la conocida influencia que tienen en el clima el comportamiento de la evaporación y precipitación a lo largo del año.

Otros se basan por ejemplo en algún elemento concreto, según la época del año cuando se producen las precipitaciones más importantes. Otros más actuales se basan en el *grado de bienestar o comodidad*.

En realidad, todas las clasificaciones producen:

i) similares resultados expresados en forma diferente, ii) en zonas distintas de la Tierra alejadas unas de otras aparecen climas similares y iii) las diferencias climáticas aparecen a la vez en lugares diferentes en relación a su posición en un continente, por ejemplo en la costa a barlovento del continente en las proximidades de las latitudes medias.

Tabla 3.

Nombre del tipo de clima	Símbolo	Precipitación Estación de la	Precipitación máxima CANTIDADES	Temperatura (°C)	
				Más frío	Más cálido
Selva tropical húmeda	Af	Todo el año	Mes mas seco > 6 cm	Mas de 18°	
Sabana	Aw	Invierno	Mes mas seco < 6 cm	Mas de 18°	
Estepa	BS	Invierno Todo el año Verano	P < 2 T P < 2 (T + 7) P < 2 (T + 14)		
Desierto	BW	Invierno Todo el año Verano	P < T P < (T + 7) P < (T + 14)		
Mesotérmico	Cf	Todo el año	Ni Cw ni Cs	-3° a +8°	* *
Mesotérmico con invierno seco	Cw	Verano	El mes más húmedo del verano, 10 veces mas húmedo que el seco del invierno	-3° a +18°	* *
Mesotérmico con verano seco	Cs	Invierno	El mes más húmedo del invierno 3 veces más húmedo que el seco del verano	-3° a +18°	* *
Microtérmico	Df	Todo el año	Como Cf	Menos de -3°	* *
Microtérmico con invierno seco	Dw	Verano	Como Cw	Menos de -3°	* *
Tundra	ET			0 a + 10°	
Glacial	EF			Menos de 0°	

Cuadro resumen clasificación climática según V.KOPPEN (1900-1930)

(*) Las estaciones son: abril-septiembre y octubre-marzo. El criterio para decidir si una estación es húmeda o seca es el que figura en los tipos Cw y Cs de la columna "cantidades".

(**) A los tipos C y D se les asigna un tercer título, de acuerdo con estas reglas: a) cuando el mes más cálido tiene una temperatura > a +22°C; b) cuando este mes tiene una temperatura < a +22°C; c) cuando la temperatura de este mes es < a +22°C y hay menos de 4 meses con temperaturas superiores a 10°C; d) cuando la temperatura del mes mas frío es < a -38°C

La tabla da las peculiaridades para la clasificación del clima de un lugar, teniendo en cuenta la temperatura media anual (T) y las correspondientes mensuales, las precipitaciones mensuales y la total anual (P), también denominada como RR.

El clasificador debe de fijar si el lugar se encuentra entre los climas estepa-desierto (tipo B) o entre los climas arbóreos (A, C, y D). La decisión se basa en conocer tanto la temperatura como la precipitación, dado que el balance entre ambas variables determina si crecerá o no una vegetación permanente o si existirá el desierto. En lugares donde no falta la humedad, se decide fundamentalmente con las temperaturas.

Hicimos mención anteriormente a criterios hidrológicos para clasificar un clima y aquí estamos hablando de balance hídrico anual.

En 1948 el climatólogo americano THORNTWAITE, ideó este sistema en base al que se han establecido mapas regionales. Constituyen la base de este método las temperaturas medias mensuales, las precipitaciones mensuales y los correspondientes anuales, con el cálculo de EP (evapotranspiración potencial).

Climatología aplicada

A veces se dan descripciones del climas sin tener en cuenta a los usuarios, no tienen mucho sentido, pero esto está cambiando desde hace tiempo y poco a poco nos vamos adaptando a las necesidades que se requieren y disponemos de buenas herramientas para ello, por ejemplo,

1. Buena colección de datos en general
2. Conocimiento total del contenido de los registros, incluídos defectos y cualidades
3. Comprensión de leyes y principios científicos que explican las causas de los diversos climas descritos por sus registros
4. Conocimiento de las varias formas en que pueden ser combinados y analizados estos datos para encontrar y expresar sus respuestas de manera útil y apropiada.

Tabla 4. Valores mundiales extremos de los elementos climáticos

(datos de "clima de la URSS" de Borisov)

Temperatura	Máximo	Mínimo
<i>Tanual media</i>	+30,2° C (Massaoua, Etiopía)	-26,0° C (Antártico)
<i>Tmedia mes más cálido</i>	+39,0° C (agosto, Valle de la Muerte, California)	-15, 0° C (diciembre, Antártico)
<i>Tmedia mes más frío</i>	+27,0° C (julio, Islas Gilbert, Pacífico del Suroeste)	Inferior a -55° C, (agosto Antártico central)
<i>Variación anual de la Tmedia mensual</i>	+66,° C (Verkhoyansk, Siberia)	0,4° C (Islas Marshall)
<i>Máxima observada</i>	+58,0° C (Aziziya, Libia)	0° C (Framhein, Antártico)
<i>Mínima observada</i>	+22,0° C (Moresby, Nueva Guinea)	- 87,4° C (Stn. Vostok Antártico)
Precipitación	Máximo	Mínimo
Total media anual	1.266 cm (Cherrapunji, India)	0 cm (Assouan, Egipto)
Promedio anual nº de días de lluvia	323 (Islas Evangelistas, Chile)	0,2 cm (" ")
Otros	Máximo	Mínimo
Humedad relativa media anual	95% (Djakarta, Indonesia)	28% (Kartoum, Sudan)
<i>Nubosidad media anual</i>	<i>93% (Camerún, África Occidental)</i>	<i>5% (Assouan, Egipto)</i>

Bibliografía

Barry, R.G., Chorley R.J. "Atmósfera, Tiempo y Clima". Barcelona. Editorial Omega

Chazarra Bernabé, A. "Boletín Mensual Climatológico de valores extremos" 2005. Madrid Instituto Nacional de Meteorología. (INM). Nota Técnica

Chazarra Bernabé, A. "Clasificación Climática de Thornthwaite, para España" obtenida mediante Técnicas SIG. Madrid. Instituto Nacional de Meteorología. (INM). Nota Técnica

- Cuadra y Pita, J.M. "Climatología". 1997 Madrid. Editorial Cátedra S.A.*
- Essenwanger, O.M.(2001). "General Climatology IC: Clasificación of Climate". Wordl Survey of Climatology. Volumen IC. Elsevier. Amsterdam*
- Font Tullol, I."Historia del Clima de España". 1988. Instituto Nacional de Meteorología.*
- Font Tullol, I. "Climatología de España y Portugal" . 2000. Ediciones Editorial Universidad.*
- Instituto Geográfico Nacional. " Climatología. Atlas Nacional de España" (2ª edición). Elaborado por el Instituto Nacional de Meteorología. (INM).*
- Jansa Guardiola, J.M. "Curso de Climatología". 1969. Sección de Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología.*
- Lines Escardó,A. " Cambios en el Sistema Climático".1990. Madrid. Instituto Nacional de Meteorología (INM).*
- Organización Meteorológica Mundial. "Meteorología. Volumen I y II". 2ª Edición 1991. Ginebra. OMM nº 266*
- Organización Meteorológica Mundial. "Ciencias de la Tierra". Volumen I". 1973. OMM nº 266*
- Organización meteorológica Mundial. "Compendio de apuntes de Climatología".1973. OMM nº 327.*
- Organización Meteorológica Mundial. "Meteorología Polar. Comprender los efectos a escala mundial. 2007. OMM nº 1013.*
- Petisco de Lara, S.Eduardo. "Metodología para una caracterización de la circulación atmosférica en el entorno de la Península Ibérica". Nota Técnica nº9 del Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima. Instituto Nacional de Meteorología (INM), 2003. (NT SVPC nº9).*
- Petisco de Lara, S.Eduardo. "Aplicación de una caracterización de la circulación atmosférica en el área de la Península Ibérica y Baleares. Análisis de resultados del modelo climático HadCM2SUL".Nota Técnica nº 10 del Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima. Instituto Nacional de meteorología (INM), 2003. (NT SVPC nº10).*
- Straler& Straler. "Geografía Física". 1983. Editorial Omega.*
- Thomas F.Malone. " Compendium de Meteorology". 1951.American meteorologied Society, Boston, Massachussets.*
- Thornhwaite, C.W. "An approach toward a rational classification of climate. (1948). Geographical Review 38-55-94.*

CAPÍTULO 2

EVIDENCIAS DEL ACTUAL CAMBIO CLIMÁTICO

Dr. José M^a Baldasano

Catedrático de Ingeniería Ambiental (UPC)

Director del Área de Ciencias de la Tierra (BSC-CNS)

Premio Rey Jaime I Medio Ambiente 1997

Experto del IPCC

Introducción

El clima de la Tierra no tiene ni ha estado nunca en equilibrio estático, sino todo lo contrario, ha demostrado una actividad y evolución dinámica extraordinariamente fantástica. Su estado actual depende de la actividad de la biosfera para mantener las condiciones que la existencia de vida requiere. La atmósfera, la hidrosfera, la litosfera, etc. han evolucionado durante millones de años gracias a la actividad biológica que ha sido capaz de hacer variar las características del medio. Cada especie desempeña un papel en el sistema natural que no es constante en el tiempo sino que ha condicionado la evolución del propio sistema. El resultado es un equilibrio dinámico que ha mantenido hasta ahora las condiciones de vida en el planeta Tierra.

En el sistema Tierra todo esta interconectado, en el que cualquier fenómeno que se da en una de sus partes se transmite e influencia al resto. Estas interacciones mutuas entre estructuras vivas y minerales tienden al objetivo de su estabilidad.

El clima ha variado fuertemente de forma natural a través de la historia del planeta Tierra. Ello es debido a diferentes factores naturales, de diferente magnitud, como son: la actividad del Sol, las variaciones de la órbita de la Tierra, derivas continentales, impacto de meteoritos, corrientes oceánicas, erupciones volcánicas intensas, etc. Pero también a la existencia de los seres vivos, que con su existencia y actividad han regulado la composición de la atmósfera terrestre.

Pero en los últimos dos siglos, el incremento exponencial del número de individuos de la especie humana, al aumento de su esperanza de vida, al aumento de sus actividades: agrícolas, industriales, urbanas y de transporte, y de una profunda modificación de sus hábitos de comportamiento, pero especialmente por el desarrollo de un modelo socioeconómico-energético basado en el uso intensivo de los combusti-

bles fósiles. La humanidad se ha convertido de una forma progresiva, pero muy rápidamente hablando en términos de tiempo geológico, en un nuevo factor climático (véase la figura nº 1).

Evolución de la población de la especie humana (UN 1999 - 2004)

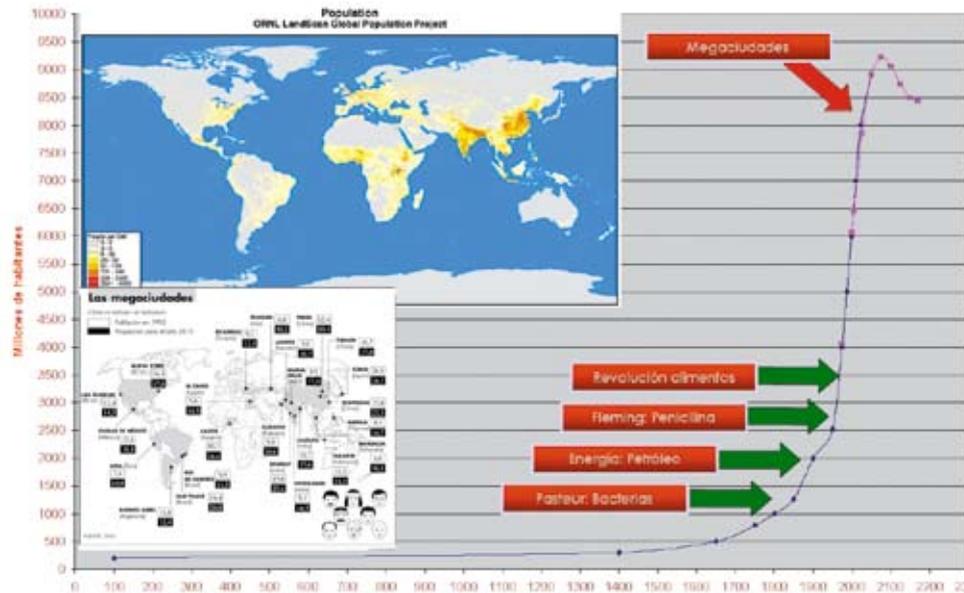


Figura 1. Incremento de la población de la especie humana en los últimos 2000 años, su distribución e ilustración de la actual tendencia a un proceso de urbanización creciente (UN 1999, 2004)

La teoría del cambio climático

Todo empezó hace unos cuantos miles de años cuando el hombre descubrió el fuego y su uso.

La idea de que las concentraciones de ciertos gases en la atmósfera – los llamados gases de efecto invernadero (GEIs) [vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (N_2O sobre todo), ozono (O_3) y el hexafluoruro de azufre, los hidrofluorocarburos y los perfluorocarburos, etc.] (el balance entre la energía solar retenida y la irradiada esta controlada por estos gases) - podían afectar a la temperatura del aire y por extensión al clima no es tan nueva. Fue el científico francés Fourier, quien en 1824 sugirió que la atmósfera terrestre actúa como un vidrio en un invernadero, permitiendo la entrada de la radiación solar, pero captando parte de la radiación emitida por la superficie terrestre.

A esto actualmente se le ha llamado el *efecto invernadero*, que es un fenómeno natural. Ello es debido a que ciertos gases que componen la atmósfera terrestre tienen la propiedad de captar la radiación infrarroja emitida desde la superficie terrestre (a unas longitudes de ondas específicas), esta propiedad de la atmósfera terrestre permite que la temperatura media global superficial de la Tierra sea del orden de 33 °C más caliente, es decir que tengamos un valor de 15 °C en lugar de - 18 °C.

En el año 1896, el "Philosophical Magazine and Journal of Science" publicó un artículo del premio Nóbel de Química del año 1903 Arrhenius, donde indicaba la posibilidad teórica de que la quema a gran es-

cala de combustibles fósiles provocaría el incremento de CO₂ en la atmósfera terrestre, y en consecuencia un “*calentamiento global*”, provocando un aumento de la temperatura superficial de la Tierra. Vaticinó que doblar el contenido de CO₂ en la atmósfera podía provocar un incremento en la temperatura media terrestre de 4 °C (no muy alejado de las previsiones actuales).

Coetáneo de Arrhenius se encuentra el geólogo americano-británico Th. Crowder Chamberlin (1843-1928) el cual intuyó el destacado papel del balance oceánico y geológico, además del atmosférico, en el fenómeno del calentamiento global (Chamberlin, 1896). Su visión como geólogo permitió la gestación de un conjunto de observaciones clave para el desarrollo de la teoría del cambio climático:

- Evidencias de grandes variaciones en la temperatura de la Tierra, tal como revelan los depósitos glaciales.
- Evidencias de grandes variaciones en el contenido de humedad de la atmósfera de la Tierra, tal como revelan los depósitos de sal y yeso.
- Evidencias de grandes variaciones en el contenido de carbono orgánico, tal como revelan las minas de carbón.
- Evidencias de grandes variaciones en el número de especies de la Tierra, tal como revelan los archivos paleontológicos.

Podría considerarse a Chamberlin como el acuñador del concepto que hoy se conoce como “*cambio climático*” (Fleming, 2000).

Al ingeniero británico y meteorólogo aficionado Callendar (1898-1964), se le considera el precursor de las observaciones de la concentración de CO₂ en la atmósfera y su relación con las emisiones antropogénicas motivadas por el empleo de combustibles fósiles. En 1939 se preocupaba por el efecto sobre la temperatura terrestre de las emisiones antropogénicas que calculaba en 9.000 t/min (Callendar, 1939); aunque, en la actualidad ya se superan las 700 t/s (IPCC 2001). Además, empezó a estimar las cantidades de CO₂ presentes en la atmósfera a través de la compilación de múltiples datos por todo el mundo (Callendar, 1958) a partir de mediciones que luego se han hecho más populares desde el observatorio de Mauna Loa en Hawai (Keeling, 2002). Véase la figura nº 2.

Pero no fue hasta los años 70s del siglo XX, que la hipótesis de que un forzamiento de origen humano en la concentración de los GEIs pudiera tener una influencia en el clima atrajo la atención del mundo científico, mediante un forzamiento humano del efecto invernadero natural.

Actualmente, se tiene totalmente confirmada la constatación de un aumento muy rápido e importante de la concentración de CO₂, y de otros GEIs, en la atmósfera terrestre. Su valor medio anual se sitúa ya en 380 ppm (medido en los observatorios de Mauna Loa (Hawai, USA), e Izaña (Tenerife, España). Hoy en día existe una red de seguimiento global (WMO World Data Centre Greenhouse Gases).

Los datos paleoclimáticos de medidas en el hielo de la Antártida de los últimos 420000 años (Petit et al, 1999), y 650000 años (EPICA, 2005), dominados por causas astronómicas, y explicados por la teoría de Milankovitch, indican una variación natural únicamente en el rango de 180-300 ppm para el CO₂, con una total correlación con la evolución de la temperatura.

La fuente primaria de este incremento desde la situación pre-industrial ha sido el uso de una forma absolutamente desahogada en la historia del planeta de los combustibles fósiles, Las emisiones de CO₂ han aumentado desde un valor medio de 6.4 [6.0-6.8] Gt C (23.5 [22.0-25.0] Gt CO₂) por año en los 90s, a 7.2 [6.9-7.5] Gt C (26.4 [25.3-27.5] Gt CO₂) en el período 2000–2005. Así como, en menor medida, a

cambios profundos en el uso del suelo, debidos principalmente a una acentuada extensión de la agricultura intensiva, y al proceso creciente de urbanización.

Este comportamiento es similar para el metano (CH_4), el segundo gas de efecto invernadero más importante, con un valor en el año 2005 de 1774 ppb, frente a un valor preindustrial de 715 ppb, y un rango de variación de 320-790 ppb. Lo mismo sucede con el óxido nitroso (N_2O), cuya concentración ha aumentado desde la situación pre-industrial desde alrededor de 270 ppb a 319 ppb en el año 2005.

Es decir, es decir aumentos que están fuera de cualquier valor del rango en que han estado dominados por la variabilidad natural del clima del último millón de años, y ello solo en el marco de menos de 200 años.

Si bien los fenómenos extremos glaciales se explican por la teoría de Milankovitch [Malutin Milankovi (1879-1958), astrofísico serbio, considerado el padre de la "teoría orbital del cambio climático" (Beer, 2000)], buena parte de las variaciones en la temperatura media terrestre y en la concentración de CO_2 en la atmósfera no quedan totalmente explicados por la teoría orbital.

Una de las aproximaciones a dicha variabilidad queda recogida en los ciclos de actividad solar -manchas solares- (véase la figura nº 3), con picos cada 11 años (Lassen, 1995; Laut, 1998).

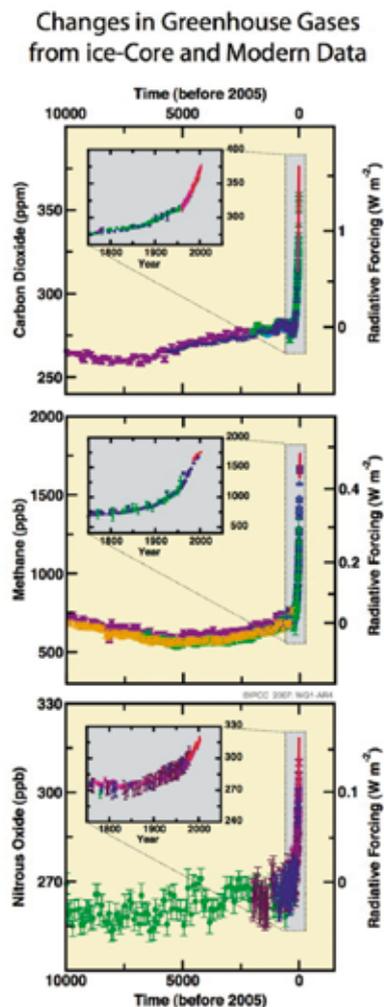
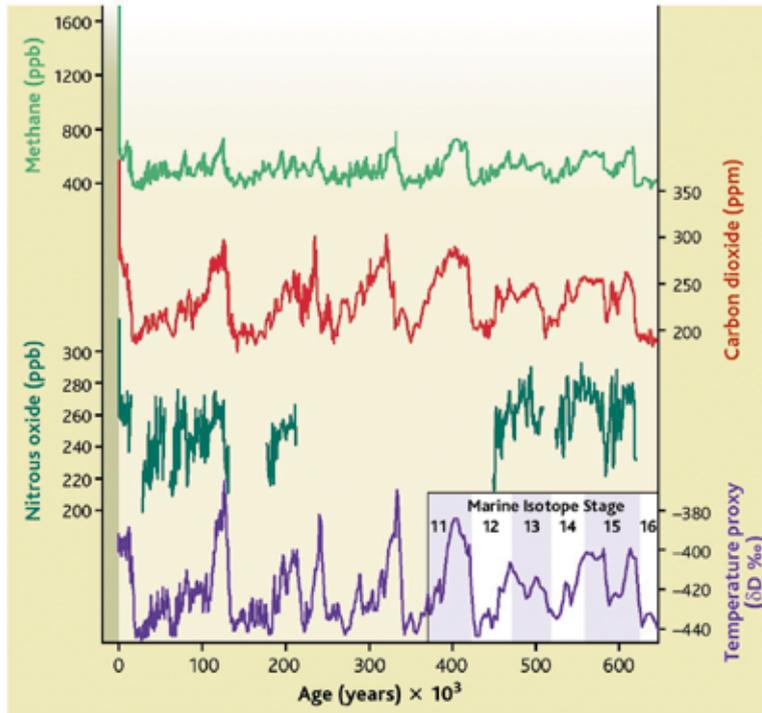


Figura 2. Incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero en los últimos 10000 años (IPCC 2007)



The long view. The greenhouse gas (CO_2 , CH_4 , and NO_2) and deuterium (δD) records for the past 650,000 years from EPICA Dome C and other ice cores, with marine isotope stage correlations (labeled at lower right) for stages 11 to 16 (2, 3). δD , a proxy for air temperature, is the deuterium/hydrogen ratio of the ice, expressed as a per mil deviation from the value of an isotope standard (4). More positive values indicate warmer conditions. Data for the past 200 years from other ice core records (20–22) and direct atmospheric measurements at the South Pole (23, 24) are also included.

Figura 3. Resultados del proyecto EPICA (Brook, 2005)

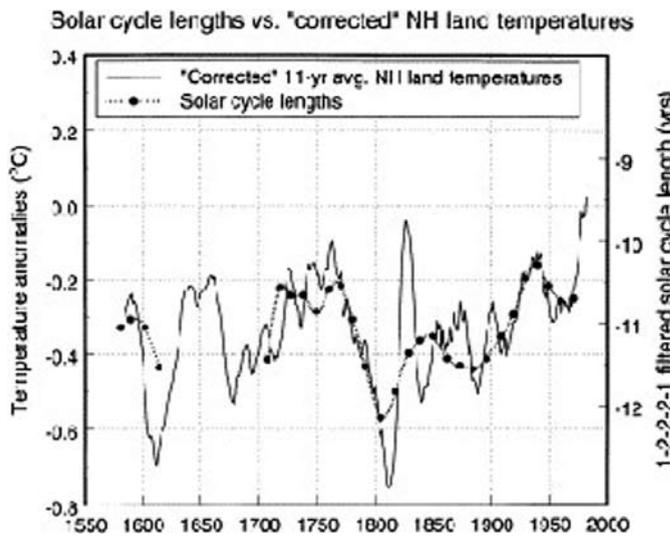


Figura 4. Ciclos solares y anomalías de temperatura (Laut, 1998)

Entre los ciclos de baja frecuencia de ocurrencia (orbitales) y los ciclos solares de alta frecuencia (10-12 años), existen otros ciclos que permiten justificar la evolución del clima hasta principios del siglo XIX (Westfall, 2004). En general, los ciclos de mayor período justifican cambios más extremos (20°C de variación global en la temperatura con episodios extremos de 15°C en 50 años).

- Ciclos de baja-media frecuencia: Ciclos de Bond, cada 1350 a 1550 años, con variaciones de más de 8°C de temperatura en una década (Bond, 1997).
- Ciclos de baja frecuencia: Pacific Decadal Oscillation (PDO), cada 40 a 60 años (Mantua, 1997).
- Ciclos de muy baja frecuencia: El Niño, la Niña, cada 3 a 6 años.

No obstante todo ello, los modelos climáticos globales (GCM) necesitan incluir una componente de contribución antropogénica sobre la componente natural para poder reproducir la evolución climática de los últimos años (véase la figura nº 4).

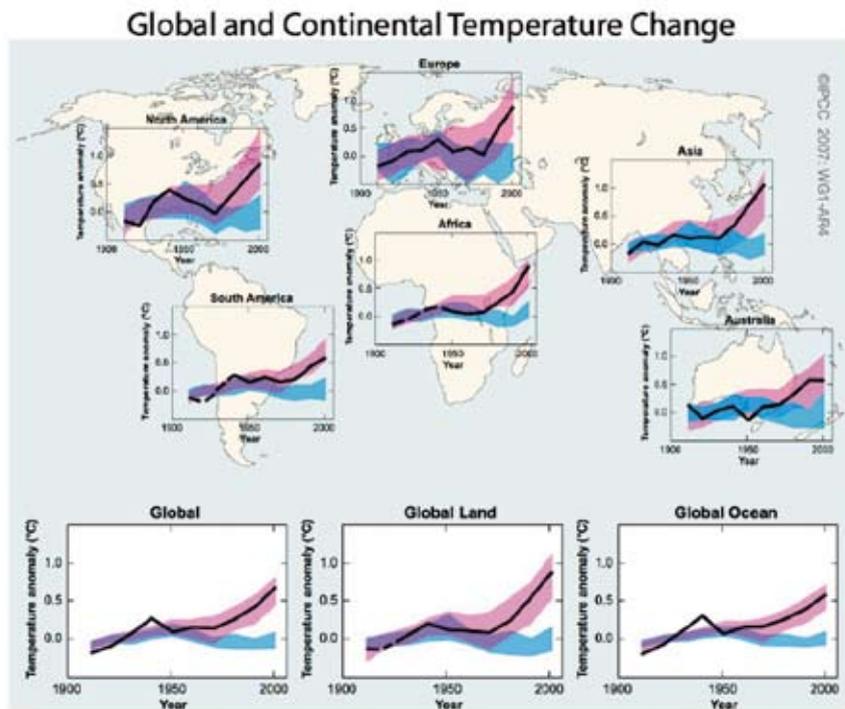


FIGURE SPM-4. Comparison of observed continental- and global-scale changes in surface temperature with results simulated by climate models using natural and anthropogenic forcings. Decadal averages of observations are shown for the period 1906–2005 (black line) plotted against the centre of the decade and relative to the corresponding average for 1901–1950. Lines are dashed where spatial coverage is less than 50%. Blue shaded bands show the 5–95% range for 19 simulations from 5 climate models using only the natural forcings due to solar activity and volcanoes. Red shaded bands show the 5–95% range for 58 simulations from 14 climate models using both natural and anthropogenic forcings. (FAQ 9.2, Figure 1)

Figura 5. Simulaciones del clima de los últimos 150 años (IPCC 2007). Donde se ha discriminado la variabilidad natural del clima (azul) del actual forzamiento humano (rosa)

A este forzamiento humano del clima es lo que se ha denominado *cambio climático debido a un calentamiento global*, conformando la actividad de la especie humana como un nuevo factor climático.

Existen también otras teorías, que señalan que la fuente de las actuales variaciones de la temperatura se debería a otras razones. Particularmente al papel que podrían jugar los rayos cósmicos.

Los cambios en la irradiación solar desde el año 1750 han sido estimados que presentan una variación positiva de únicamente 0.12 W/m^2 [+0.06 to +0.30] de su forzamiento radiativo.

También se ha señalado el papel de otros agentes climáticos, tales como las erupciones volcánicas. Efectivamente, las grandes erupciones volcánicas actuales juegan un determinado papel, al inyectar grandes emisiones de nuevos gases en la atmósfera terrestre, generalmente de enfriamiento, pero su efecto temporal se restringe a un efecto muy limitado en el tiempo, de solo algunos pocos años. El último caso claro ha sido la erupción del volcán Pinatubo en el año 1991.

Evidencias del actual Cambio Climático

En los últimos años, han aumentado de una forma muy significativa el número de evidencias sobre la influencia humana en el forzamiento de un cambio climático.

Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC): 1990, 1995, 2001 y 2007, indican que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles debidas a las actividades humanas, están modificando la atmósfera terrestre, que ello ya esta afectando al clima de la Tierra, y que es prácticamente seguro que las emisiones generadas en el uso de combustibles fósiles son el factor determinante debido a la tendencia de una mayor concentración de dióxido de carbono (CO_2) durante los siglos XIX y XX, como así se señala en el 4º Informe de Evaluación del IPCC (2007) [AR4]:

“El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como se deriva de las evidencias desde las observaciones del aumento de la temperatura media del aire, y de los océanos, de la amplia fusión de las nieves y hielos, y del aumento del nivel medio del mar”

El informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente también así lo confirma (EEA 2004).

Lo más importante de este informe, no es el conjunto importante de extensión y confirmación de las series de datos y de nuevos datos, que en si mismo si lo son, que confirman más las conclusiones anteriores. Sino, que especialmente en los últimos años, el proceso de calentamiento y sus efectos asociados han aumentado.

A continuación se indican una larga lista de las existentes evidencias sobre el actual proceso de Cambio Climático, bien de carácter global, o a una escala espacial más limitada.

- La temperatura media del aire ha tenido una tendencia lineal de aumento positivo de $0.74 \text{ }^\circ\text{C}$ [0.56 to 0.92] de 1906-2005 (superior a los $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ [0.4 to 0.8] del período 1901-2000, señalada en el TAR (IPCC 2001), tomando como referencia la temperatura media del período 19961-1990
- El incremento desde 1850-1899 a 2001-2005 ha sido de $0.76 \text{ }^\circ\text{C}$ [0.57-0.95]. Los efectos de isla de calor son reales pero de efecto local, y con una influencia muy limitada en esta tendencia de aumento.
- Observaciones desde el año 1961 indican que la temperatura media de los océanos ha aumentado hasta profundidades mayores a los 3000 m de profundidad, y se estima que ha absorbido

el 80% del calor añadido. Este calentamiento está provocando su expansión térmica y contribuyendo al aumento del nivel del mar.

- Los glaciares y la cubierta de nieve están disminuyendo en ambos hemisferios, esto contribuye también al aumento del nivel de mar.
- Los nuevos datos desde el TAR (IPCC 2001) muestran que pérdidas de hielo desde Groenlandia y Antártida han sido, muy probablemente, un aporte para el aumento del nivel del mar entre 1993 y 2003. Los flujos han aumentado desde los glaciares que vierten directamente al mar en Groenlandia y en la Antártida. Además de una disminución de su espesor. Así como, un aumento de los movimientos glaciares en los últimos años, especialmente en el período del deshielo estival.
- El nivel medio global del mar mundial aumentó en un promedio de 1.8 mm [1.3 a 2.3] por año entre 1961 a 2003. El cambio fue más rápido entre 1993 a 2003, alrededor 3.1 mm [2.4 a 3.8] por año. Este valor puede reflejar una variabilidad temporal, o bien un aumento en la tendencia a largo plazo, esta diferencia no está clara. Existe una elevada confianza de que la velocidad de cambio del aumento de nivel del mar observado incrementó desde el siglo 19th al 20th. El aumento total en el siglo XX se estima ser de 0.17 m [0.12 a 0.22].

A escalas continentales, regionales y oceánicas, numerosos cambios significativos en el tiempo han sido también observados:

- Las temperaturas en el Ártico han aumentado en casi dos veces el aumento medio mundial de los últimos 100 años. Las temperaturas árticas tienen una elevada variabilidad entre décadas, y un período caliente ha sido observado entre los años 1925 a 1945.
- Los datos de satélite desde 1978 muestran que la extensión media anual del hielo Ártico se ha reducido en un 2.7 % [2.1 a 3.3] por década, con una disminución más grande en el período de verano del 7.4 % [5.0 a 9.8] por década (este verano 2007 se ha obtenido el máximo de deshielo reciente, tanto en extensión como en fechas).
- Las temperaturas en la capa superficial del *permafrost* han aumentado desde los años 80s en el Ártico (hasta 3 °C). El área máxima cubierta de acuerdo a la estación fría ha disminuido en aproximadamente un 7 % en el Hemisferio Norte desde 1900, con una reducción en la primavera de hasta 15 %.
- Tendencias a largo plazo desde 1900 a 2005 en la cantidad de precipitación sobre grandes regiones han sido observadas. Significativamente el aumento ha sido observado en las partes orientales del Norte y Sur de América, Europa del Norte y Asia del Norte y central. En cambio, su disminución ha sido observada en el Sahel, en el Mediterráneo, en África del Sur y partes de Asia del Sur. El patrón de precipitaciones es altamente variable, tanto espacial como temporalmente, y los datos son limitados en algunas regiones. Tendencias a largo plazo no han sido observadas en otras regiones evaluadas.
- Los cambios en la precipitación y evaporación sobre los océanos sugieren un enfriamiento las aguas en latitudes medias y altas, juntamente con un aumento de la salinidad en las aguas de latitudes bajas.
- Vientos en latitudes medias de componente oeste se han reforzado en ambos hemisferios desde los años 60s.

- Sequías más intensas y largas han sido observadas sobre áreas más amplias desde los años 70s, particularmente en los trópicos y subtropicos. Aumento de períodos secos relacionados con temperaturas más altas y precipitaciones más reducidas han colaborado en aumentar las sequías. Cambios en temperaturas de superficie del mar (TSS), patrones de viento, y reducción de la cantidad de nieve también están vinculados con períodos de sequías.
- La frecuencia de los episodios de fuerte precipitación ha aumentado en la mayoría de las áreas continentales, lo cual es consistente con el calentamiento y el observado aumento del vapor de agua atmosférico.
- Amplios cambios en las temperaturas extremas han sido observados durante los pasados 50 años. Días fríos, noches frías y heladas se han vuelto menos frecuentes, mientras que días y noches calurosas, y las olas de calor se han hecho más frecuentes
- Hay observaciones de un aumento de la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico norte desde aproximadamente los años 70s, correlacionado con los aumentos de las temperaturas superficiales del mar. También hay indicios de un aumento de la actividad de ciclones tropicales en otras regiones, donde existen menos datos, así como sobre su calidad. No hay ninguna tendencia clara en los números anuales de los ciclones tropicales.

Información detallada se puede encontrar en el AR4 (IPCC 2007), pero especialmente en las revistas *Science*, *Nature*, *Journal of Geophysical Research* y otras.

No obstante, es necesario mencionar también, que todavía quedan muchos interrogantes sobre el actual proceso de Cambio Climático. Existen críticas sobre las series de datos utilizadas, particularmente sobre el desajuste entre su longitud en años en correspondencia a las escalas temporales de los procesos climáticos; así como, también por su alcance espacial. Pero conviene señalar, que precisamente estos procesos críticos, son altamente positivos, y constituyen uno de los mayores factores de reforzamiento, pues someten los datos a revisiones exhaustivas que aumentan su fiabilidad.

La situación actual es de una elevada actividad de seguimiento que combina diferentes enfoques, con un alto nivel de integración entre ellos, como es el uso de las medidas instrumentales directas, de desarrollo de técnicas y metodologías paleoclimáticas, del desarrollo de modelos climáticos con un alto nivel de incorporación de procesos y mejora sustancial progresiva de su resolución espacial y del uso de satélites que nos están permitiendo ver y entender más y de forma acelerada el funcionamiento de nuestro planeta Tierra.

Existen también otras teorías, que señalan que la fuente de las actuales variaciones de la temperatura se debería a otras razones. Particularmente al papel que podrían jugar los rayos cósmicos.

Hemos de ser conscientes que la intensificación y explosión de los estudios sobre el conocimiento del funcionamiento climático del planeta tienen apenas 35 años.

Pero el dato más objetivo, no discutido, es el acelerado incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero, con valores fuera de cualquier antecedente en los últimos 600.000 años.

Expectativas futuras

El actual nivel de conocimientos y el análisis de los resultados de los modelos climáticos, con las limitaciones que se quiera, permite una evaluación de la sensibilidad de clima por primera vez, con

suficiente confianza para entender las respuestas de sistema climático a los diferentes forzamientos radiativos; y por consiguiente, poder tener una perspectiva de futuro.

Las expectativas de aumento de la temperatura media global que se derivan de los cálculos de los modelos climáticos para este siglo XXI se sitúan entre 3 °C [2-4.5]. Esto puede tener efectos catastróficos en todo el planeta, en los diferentes ecosistemas que lo conforman. Todas las predicciones actuales indican claramente que el cambio climático va a tener un efecto sobre los distintos sectores que componen la presente civilización humana.

Es necesario señalar, no obstante, que las predicciones existentes son fiables, pero tienen un amplio margen de incertidumbre, no tanto a la escala global del planeta, pero sí cuando queremos que tengan una mayor grado de detalle sobre los continentes y más sobre regiones más pequeñas. También conviene ser prudente en cuanto a la extensión en el tiempo de las actuales previsiones. Este marco de prudencia se justifica por varias razones:

1. Los tiempos de las escalas climáticas y el alcance de los datos actuales disponibles.
2. La dificultad de poder proyectar el actual patrón de emisiones con un grado elevado de fiabilidad más haya de 20-30 años.
3. Del conjunto de medidas de reducción de emisiones que se sea capaz de adoptar y llevar a la práctica, es decir de nuestra capacidad de respuesta, que nos permiten definir escenarios de futuro.

La principal razón para la prudencia, se basa en nuestra limitada capacidad para poder definir el patrón futuro de emisiones, en nuestra capacidad para seguir con el actual modelo de aumento continuado de las mismas, o bien adaptar las medidas correspondientes que permitieran estabilizar la concentración de CO₂ a valores entre 450-550 ppm. De hay la importancia de las actuales discusiones sobre el alcance de los acuerdos en que pueda finalizar lo que se ha dado en llamar Kyoto II.

No obstante, la prudencia indicada, las consecuencias son de tal magnitud que no se deben retardar, las absolutamente necesarias medidas de adaptación y mitigación. Todo lo contrario, el tiempo para ello empieza a escasear.

A continuación se indican los efectos que se pueden derivar del actual cambio climático, algunos de ellos ya se están produciendo, y se espera que se intensifiquen rápidamente en los próximos años. El informe de este año 2007 del IPCC ha confirmado estos efectos. Se puede diferenciar entre efectos primarios y secundarios.

Efectos primarios

- Aumento de la temperatura media superficial de 2 a 4.5 °C en el siglo XXI, aunque existen previsiones que indican un mayor incremento, estos incrementos no tienen precedentes en los últimos 10000 años (muy probable);
- Se esperan temperaturas máximas mayores y días más cálidos en todas las zonas, así como también temperaturas mínimas mayores y menores días fríos (muy probable);
- Se espera un incremento en la desertificación de ciertas zonas del planeta (probable);
- Las lluvias deberán tener un mayor carácter torrencial en otras zonas (muy probable). Con un mayor nivel de precipitación en latitudes altas, y en las bajas latitudes hay regiones con incre-

mento y decrecimiento de los niveles de precipitación. Más sequías e inundaciones. Ciclones más intensos. Aumento de los fenómenos meteorológicos extremos (probable).

- Se espera subidas del nivel del mar entre 13 y 94 cm, que inundaría zonas hoy día densamente pobladas, con desaparición de islas (probable);
- Las previsiones también apuntan a un aumento de riesgos de sequías (especialmente en los veranos) y ciclones, y a una intensificación de los procesos de deshielo (probable).
- Difusión de ciertas enfermedades de tipo tropical en zonas con clima actualmente templado (probable).
- Retroceso del hielo y pérdida de nieve: deshielo de los casquetes polares (especialmente del Ártico) y debilitamiento - desaparición de los glaciares en todas las latitudes.
- Habitats en peligro: modificación y desaparición de ecosistemas, especialmente de todo tipo de zonas húmedas
- Alteración de las corrientes marinas: posible interrupción de la corriente oceanográfica termohalina, debido a cambios en el actual patrón de salinidad, especialmente en el océano Ártico.

Efectos secundarios

- Extinción de especies de flora y fauna vinculadas a ecosistemas y habitats en peligro
- Cambios en la vegetación con el retroceso de algunas especies (tales como hayas y brezos en España).
- Incremento de zonas desérticas (p.e. la zona del Sahel)
- Descenso de la productividad agrícola debido al estrés hídrico
- Problemas de suministro de agua
- Extensión de los cultivos en zonas frías como Siberia y Canadá
- Aumento de los incendios forestales. La cuenca mediterránea es una de las áreas más vulnerables
- Propagación de enfermedades tropicales, tales como la malaria y el dengue, hacia regiones más templadas
- Turismo. Desplazamiento hacia zonas más al norte. Desaparición de playas. Pérdida de nieve esquiable
- Las convulsiones climáticas podrían generar hasta el año 2050 unos 150 millones de refugiados del clima (disminución de cosechas con la consiguiente generación de hambrunas)

A nivel Europeo (Acacia 2001, IPCC 2001b), las previsiones de los impactos se concretan en los siguientes aspectos:

- La capacidad adaptativa de los sistemas humanos es generalmente alta en Europa, la Europa del sur y los sistemas Árticos pueden ser más vulnerables que otras partes de Europa;
- La escorrentía en verano, la disponibilidad de agua, y la humedad del suelo probablemente

decrecerán en el sur de Europa, y se deberán ampliar las diferencias entre el norte y las sequías del sur (confianza alta);

- La mitad de los glaciares y de las grandes zonas heladas deberán desaparecer para el final del siglo XXI (confianza media);
- Las posibilidades de fenómenos de inundación se aumentarán sobre Europa (confianza media y alta), en las zonas costeras, el riesgo de inundación, erosión, y pérdidas de zonas húmedas deberá incrementarse sustancialmente con implicaciones en los asentamientos humanos, industria, turismo, agricultura, y zonas costeras naturales;
- Deberán presentarse efectos positivos en la agricultura del norte de Europa (confianza media), pero la productividad deberá disminuir en el sur y este de Europa (confianza media);
- Se deberán producir cambios en positivo y negativo de los diversos habitats naturales. Pérdidas de importantes habitats (humedales, tundra, habitats aislados) deberán amenazar a algunas especies (confianza alta);
- Altas temperaturas y olas de calor pueden cambiar destinos tradicionales del turismo de verano, y unas menores condiciones fiables de nieve puede afectar al turismo de invierno (confianza media).

Aumentando el foco, las expectativas sobre la cuenca Mediterránea es que probablemente lloverá menos, o que aumentará la estacionalidad, y que la lluvia caerá de una forma más concentrada en períodos concretos del año. Otro factor de modificación es que la precipitación sea más en forma de lluvia y menos en forma de nieve. Con lo cual, la reserva de agua que representa el manto nival se perderá o disminuirá fuertemente.

Es conveniente señalar, que estos efectos tendrán una respuesta ampliamente heterogénea en el conjunto del planeta. Es decir, que su distribución espacial no será uniforme, sino por el contrario, presenta un alto grado de variación territorial.

El clima terrestre es un sistema altamente complejo de delicado equilibrio, con mecanismos que interaccionan en direcciones opuestas entre la atmósfera, la superficie, los océanos y los hielos, donde intervienen los aerosoles atmosféricos y las nubes; que esta sujeto a fluctuaciones naturales (esto es lo que se denomina: *variabilidad natural del clima terrestre*). Por estas razones, discernir claramente la componente de forzamiento humano en el clima terrestre de forma separada a las fluctuaciones naturales es una cuestión fundamental pero de discriminación problemática.

Conclusiones

Una de las cuestiones claves es la respuesta del proceso en el tiempo. En los comienzos de análisis del cambio climático se pensaba en una respuesta relativamente lenta del proceso: *para mediados-finales siglo XXI*. En estos momentos, toda la información recogida, esta indicando que el proceso puede estar produciéndose a un ritmo mucho más rápido del inicialmente considerado: *ya se esta produciendo*. La información existente, parece indicar que dicho proceso podría estar acelerándose.

Existe la hipótesis plausible, de una fuerte alteración de la actual dinámica de las circulaciones oceanográficas, que podría conllevar a un desbalance del actual equilibrio climático, y dar lugar a un proceso de enfriamiento acelerado. Esta hipótesis representa actualmente la mayor incertidumbre en el proceso climático que hemos empezado y estamos forzando. Los datos que existen al respecto son muy limitados.

El Protocolo de Kioto es un primer paso y una referencia para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, pero son necesarias reducciones mucho más drásticas si se quiere evitar que el cambio climático alcance consecuencias catastróficas de orden medioambiental, económico y social para toda la humanidad. La comunidad internacional debe comenzar urgentemente a negociar un nuevo acuerdo mundial, completo y ambicioso, que suceda al de Kyoto, a partir del año 2012, y además que se ejecute con urgencia.

El próximo paso esencial debe consistir en que el conjunto de países desarrollados reduzca de forma radical sus emisiones. Los países en vías de desarrollo también necesitan comenzar a reducir el aumento de sus emisiones en la medida de sus posibilidades. Este audaz objetivo es realizable y asequible, y resulta esencial si queremos tener posibilidades de limitar el calentamiento del planeta a un máximo de 2 °C respecto a la temperatura preindustrial, con el objetivo de intentar estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera en 450 ppm.

La controversia que suscita el actual cambio climático, a diferencia del problema ambiental del agujero de la capa de ozono en la estratosfera, es debido a que pone en cuestión el actual sistema socio-económico de crecimiento sostenido, e implica una modificación total del modelo energético existente, basado fundamentalmente en los combustibles sólidos (representan el 80% de la energía primaria consumida a nivel mundial), forzando su finalización lo antes posible, independientemente de la discusión sobre la magnitud y disponibilidad de sus reservas.

Estamos en un nuevo proceso de cambio climático, inducido por la actual civilización humana por su actual modelo socio-económico-energético, y cuyas consecuencias solo las sabemos para una fase inicial, y todo hace pensar que va acelerarse el proceso de forma importante en los próximos años.

Referencias

- Acacia (2001) *Valoración de los Efectos Potenciales del cambio Climático en Europa (Informe Acacia)*. Proyecto Acacia: resumen y conclusiones. Unión Europa, pp 29
- Arrhenius S. (1896) *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*. *Philos. Mag.* 41: 237–275.
- Beer J., Mende W., Stelmacher R. (2000) *The role of the sun in climate forcing*. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1-5, 1: 403-415.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., De Menocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. (1997), *A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates*, *Science* 278, 1997, pp. 1257–1266.
- Brook T, (2005) *Tiny Bubbles Tell All*. *Science*, 310: 1285-1287
- Callendar G.S. (1939) *The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 64: 223-237.
- Callendar G.S. (1958) *On the amount of carbon dioxide in the atmosphere*. *Tellus* 10: 243–248.
- Chamberlin T. C. (1986) *A Course in Working Methods in Geology*, University of Chicago, fall quarter 1896, 185 pp., dated 22 February 1897, folder 4, addenda box 9, T. C. Chamberlin Papers, Department of Special Collections, Joseph Regenstein Library, University of Chicago.

- EEA (2004) *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. EEA Report No 2/2004 (http://reports.eea.eu.int/climate_report_2_2004/en)
- EPICA (2005) *Eight glacial cycles from an Antarctic ice core*. (EPICA community members) *Nature*, 429: 623-628
- Fleming J.R. (2000) *T. C. Chamberlin, Climate Change, and Cosmogony*. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 31, 3: 293-308.
- Fourier J. (1824) *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. *Ann. Chim. Phys.* 27: 136–167.
- IPCC (2001a). *Climate Change 2001: The scientific basis. Technical summary*. (<http://ipcc-wg1.ucar.edu/index.html>).
- IPCC (2001b) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group 2 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, pp 944.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change WGI, Fourth Assessment report-4AR. Available online: <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>
- Keeling, C.D. and T.P. Whorf (2002) *Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network*. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, TN, USA.
- Lassen K., Friis-Christensen E. (1995), *Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate*, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 8: 835-845.
- Laut P., Gundermann J. (1998), *Solar cycle length hypothesis appears to support the IPCC on global warming*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 60, 18: 1719-1728.
- Mantua N.J., Hare N.J., Zhang Y., Wallace J.M., Francis, R.C. (1997), *A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production*, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, pp. 1069–1079.
- Petit J.R., et al. (1999) *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. *Nature* 399: 429–436
- Westfall R.D., Millar C.I. (2004), *Genetic consequences of forest population dynamics influenced by historic climatic variability in the western USA*, *Forest Ecology and Management*, 197, 1-3: 159-170.

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DE RETROALIMENTACIÓN ENTRE DESERTIFICACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO

José L. Rubio

Premio Rey Jaime I a la Protección al Medio Ambiente 1996

Centro de Investigaciones sobre Desertificación–CIDE (CSIC, Universitat de València, Generalitat Valenciana)

Introducción

El clima y el hombre son los dos factores intrínsecos asociados a los procesos de desertificación. Existe una relación directa entre algunos parámetros climáticos, fundamentalmente precipitación y temperatura, y el incremento en los procesos de desertificación y degradación del suelo. A su vez, también existen implicaciones entre las consecuencias de los procesos de deterioro del suelo y algunos factores climáticos y también sobre algunos sistemas de regulación climática. Sin embargo existe muy escasa investigación científica sobre las interacciones, en ambos sentidos, entre desertificación y cambio climático.

La tendencia de calentamiento global tiene importantes implicaciones en las zonas áridas, semiáridas y seco-subhúmedas, que son las zonas susceptibles de desertificación de acuerdo con el Convenio de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, 1994). Los Modelos de Cambio Global prevén en estas zonas, y entre otros aspectos, incrementos de temperatura (en el Mediterráneo de hasta 6,3 °C) y disminución en el volumen y en el régimen de las precipitaciones. Estos cambios pueden tener importantes implicaciones en la intensificación de procesos que afectan al riesgo de desertificación y a la producción agraria como son la erosión hídrica y eólica y los flujos de escorrentía superficial o los procesos de salinización. Un 30% de las zonas secas del planeta, que se encuentran distribuidas a lo largo de los cinco continentes, se encuentran ya afectadas seriamente por procesos de desertificación y, además, por la influencia del calentamiento global, muestran tendencia de incrementar su impacto en la estabilidad y funcionamiento ecológico del suelo y en su repercusión sobre las condiciones de vida de unas dos mil millones de personas. Muchos de los países afectados pertenecen al tercer mundo y se encuentran en situaciones de pobreza o de incipiente desarrollo socio-económico, con patrimonios basados en sistemas de subsistencia que asientan su capacidad de producir alimentos en la disponibilidad de un suelo ade-

cuado y en sus condiciones de productividad. En estas situaciones socio-económicas extremas, el suelo o la falta virtual de sus capacidades productivas, se convierte en un elemento vital en cuanto a seguridad alimentaria y supervivencia. En las situaciones de países avanzados, las condiciones de fertilidad del suelo y una agricultura altamente tecnificada y productiva, excluyen esas situaciones límite de algunas zonas del tercer mundo. Sin embargo, no eliminan las importantes implicaciones ambientales de la degradación del suelo en cuanto a la reducción de la capacidad del ecosistema terrestre de proporcionar toda una amplia gama de bienes productivos, servicios y funciones ecológicas.

En el conjunto del ecosistema terrestre del suelo ha jugado y juega un importante papel como base del desarrollo de civilizaciones y como medio del que, directa o indirectamente, procede alrededor del 90% de los alimentos que consumimos.

Además de los aspectos productivos, el suelo desempeña otras muchas funciones de regulación ecológica que afectan al conjunto del funcionamiento de la biosfera. Entre otras (Van Camp et al., 2004), constituye un importante regulador del ciclo hidrológico y de las reservas hídricas; contribuye al mantenimiento de la biodiversidad y en sí mismo es el componente terrestre más rico en diversidad biológica; constituye la base del paisaje; es un potente amortiguador de fenómenos climáticos extremos y también amortigua y filtra compuestos tóxicos para personas y para el medio natural y, en el contexto del tema que nos ocupa en este capítulo, desempeña un importante papel en la regulación del ciclo de compuestos con efecto invernadero (como vapor de agua, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, metano, polvo y aerosoles) e interviene en algunos sistemas de regulación climática.

La degradación del suelo-desertificación implica serios problemas ambientales que, a su vez, repercuten en importantes costos económicos y sociales entre los que pueden encontrarse aspectos de seguridad alimentaria, de escasez y calidad del agua, pobreza, migraciones y seguridad ambiental.

El suelo constituye la fina capa superficial viva que envuelve a Tierra. Constituye un medio biológico y como tal, sensible y vulnerable a las variaciones ambientales, sobre todo a la temperatura y a las disponibilidades de agua. Por ello y, por otros aspectos que comentaremos en este capítulo, es muy sensible a la tendencia de cambio climático y a su vez interacciona con el mismo en una intrincada serie de mecanismos que apenas empezamos a entrever.

Desertificación

Las llamadas zonas áridas del planeta (descartando las zonas de desierto o hiperáridas) ocupan 5.31 Bha distribuidas a lo largo de los cinco continentes. Dentro de ellas, las zonas áridas propiamente dichas ocupan 1.62 Bha, las semiáridas: 2.37 Bha y las seco-subhúmedas: 1.32 Bha (UNEP,1992). Estas son las zonas vulnerables a los procesos de desertificación.

Estos procesos de desertificación son particularmente intensos y dramáticos por sus consecuencias humanas en amplias zonas del norte de África y de su zona Sub-Sahariana. Otras regiones especialmente afectadas incluyen las zonas áridas de Asia, América y Australia. La desertificación también afecta al continente Europeo, especialmente a la zona mediterránea (Rubio y Recatala, 2006). La extensión e intensidad del proceso en Europa requiere la actualización de las estimaciones existentes, pero se considera que incluyendo las distintas fases del proceso, aproximadamente un diez por ciento del territorio europeo puede considerarse afectado por la desertificación.

En el Convenio de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULCD), aprobado en octubre de 1994, el proceso de desertificación se define como la degradación de las tierras de zonas áridas,

semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y actividades humanas inadecuadas. Los procesos de degradación incluyen, entre otros: erosión hídrica y eólica del suelo, salinización y sodificación, sellado y compactación, pérdida de materia orgánica y pérdida permanente de cobertura vegetal. En sus últimas consecuencias la desertificación representa el desmantelamiento de todo el potencial biosférico de la zona afectada y la conversión de la misma a la situación de un territorio yermo e improductivo.

La desertificación se desencadena debido a confluencia de factores naturales y de factores inducidos por la actividad humana. Los primeros son fundamentalmente de índole climática, como comentamos más ampliamente en otro apartado de este capítulo. Dentro de estos factores naturales, también habría que incluir los factores topográficos y de características litológicas y edáficas.

Hay que destacar que en cada zona de la superficie terrestre, con independencia de lo limitantes que puedan ser sus condiciones climáticas y edafo-geológicas, se establece, contando con el suficiente tiempo evolutivo, un equilibrio biofísico dinámico que permite el desarrollo de formas de vida adaptadas, y más o menos estables, en esas condiciones específicas. Una zona semiárida típica mediterránea permite y desarrolla dinámicas de suelo y pautas de colonización vegetal perfectamente adaptadas a esas condiciones concretas de su medio natural. En estas condiciones “naturales mediterráneas” aportan además una gran biodiversidad, un rico y variado paisaje, incluyen una enorme variedad de endemismos, interactúan entre sí y permiten el desarrollo de funciones ecológicas y proporcionan bienes y servicios a la sociedad. El medio natural mediterráneo es en sí mismo intrínsecamente rico y variado. El problema surge precisamente cuando esa sociedad no actúa correctamente en el uso y gestión de su entorno natural o cuando se producen variaciones o cambios climáticos como el actual.

En este sentido podemos resumir los factores humanos que en el mediterráneo desencadenan procesos de desertificación y que son básicamente los siguientes:

- Impactos de la escalada de incendios forestales de las últimas décadas
- Actuaciones de planificación y uso del territorio ambientalmente inadecuadas
- Crisis y abandono de la agricultura tradicional mediterránea de secano y abandono del mantenimiento y conservación de las estructuras físicas de conservación de suelo y agua (terrazas, bancales, muretes...)
- Intervenciones y prácticas agroforestales incorrectas
- Desequilibrios demográficos en la utilización del territorio con acumulación y sobrepresión en las zonas de litoral y abandono de zonas del interior
- Expansión urbana, turística e industrial ambientalmente incoherente
- Tendencia de calentamiento global y sus implicaciones de aridificación en ambientes mediterráneos
- Sobreexplotación y mala gestión de los recursos hídricos y sus consecuencias de salinización
- Contaminación química y biológica de suelos y aguas.
- Presión creciente de las actividades de turismo y recreo
- Efectos heredados de procesos de degradación del pasado

Estos factores inciden en el suelo, que constituye un recurso no renovable a escala humana y que es vulnerable, en medios mediterráneos, a los impactos anteriores. Posteriormente, las consecuencias del impacto en el suelo se transfieren paulatinamente al resto de componentes del ecosistema terrestre y a su funcionamiento. Como medio biológico, son de destacar las limitaciones que imponen la disponibilidad de agua y las variaciones de temperatura.

En nuestro entorno, la tendencia de calentamiento climático implica fundamentalmente una tendencia general de aridificación. En el suelo esta tendencia conlleva un aumento en la mineralización y una pérdida de componentes orgánicos del suelo. Se estima (Rozanov al., 1990) que la pérdida de humus del suelo ha ido en aumento desde la Revolución Industrial. Actualmente es de unos 760 millones de toneladas al año y la tendencia es a incrementarse debido a la degradación del suelo y a los efectos del calentamiento global. La tendencia de aridificación afecta a una de las propiedades cruciales del suelo que es su estructura. La estructura del suelo es la disposición entre sí de sus componentes minerales (partículas de arcilla, limos y arenas) y orgánicos como resultados de lentos y complejos procesos bioquímicos y electroquímicos. En los estudios del Departamento de Degradación y Conservación de Suelos del Centro de Investigaciones sobre Desertificación- CIDE-, de Valencia, se destaca el importante papel que juega la estructura del suelo en cuanto a regulación de las condiciones de estabilidad, fertilidad y resistencia a procesos de degradación. Otros autores (López Bermúdez et al. 1996) coinciden en esta valoración.

La estructuración o agregación del suelo es responsable de que el mismo pueda ser un medio biológicamente activo, regulador del ciclo hidrológico, regulador de intercambios gaseosos con la atmósfera y que pueda ser soporte mecánico y nutritivo de la cobertura vegetal. La degradación de la estructura del suelo, que puede incrementarse como consecuencia de la tendencia de aridificación, puede tener numerosas e importantes consecuencias (Rubio, 2007). El proceso básico que se vería afectado, sería la dinámica de la descomposición de los restos vegetales que se desequilibra incrementándose los procesos de mineralización en detrimento de los complejos y lentos procesos bioquímicos de humidificación que dan lugar a la formación de humus, compuesto esencial del suelo y en gran parte responsable de la formación de agregados. La disminución de la proporción de humus en el suelo y sus consecuencias en la degradación de la estructura afecta a la capacidad del suelo de gestionar y mantener las reservas de humedad. Las características de la superficie del suelo, muy condicionadas por el tipo de estructura y agregación, influyen significativamente en la génesis de escorrentías superficiales. En efecto, en la superficie edáfica se establece, en gran medida, la partición del agua de las precipitaciones en agua de infiltración, agua de escorrentía, recarga de acuíferos, evaporación y agua que queda retenida en el suelo y que será utilizada por los organismos edáficos y las raíces de las plantas. La estructura también afecta a la dinámica de los nutrientes y por tanto a la fertilidad química del suelo. La degradación de la estructura incide asimismo sobre las propiedades físicas del suelo empeorándolas y disminuyendo, por ejemplo, la capacidad intrínseca del suelo de soportar procesos erosivos. La tendencia de calentamiento también incidirá en el mantenimiento de las sales en el perfil del suelo y su eventual ascenso a la superficie del mismo por los previsibles incrementos de la intensidad de la evapotranspiración. Para el buen funcionamiento del sistema edáfico éste debe de mantener un nivel adecuado de sales, situación que puede verse afectada negativamente si no se produce el lavado, por disminución de las precipitaciones y, además, se aumenta el ascenso de compuestos salinos en el perfil por el incremento de las temperaturas y de la evaporación. Actualmente y a lo largo de toda la costa mediterránea ya existen situaciones de salinización de aguas superficiales y de acuíferos litorales que plantean serias incertidumbres y un intenso debate social.

En general, la tendencia de calentamiento y los procesos de desertificación producirán una disminución del funcionalismo ecológico y de la capacidad productiva del suelo, incluyendo la disminución de su capacidad de almacenamiento de reservas hídricas.

Otro aspecto importante relacionado con las funciones del suelo es su capacidad como factor amortiguador ante episodios climáticos extremos. Entre ellos podríamos incluir los impactos de sequías o los efectos de lluvias torrenciales (incluyendo fenómenos de gota fría). Un suelo degradado por los distintos procesos que hemos visto anteriormente, es intrínsecamente menos estable y es más fácilmente desagregado y movilizado. Su capacidad de infiltración también puede verse afectada incrementándose los valores relativos de escorrentía. En estas circunstancias se aumentan los efectos de las avenidas de agua, los deslizamientos en masa, las avalanchas y las inundaciones. Al aumentar el volumen de suelo arrastrado, las escorrentías aumentan su energía destructora. Los efectos de riadas, deslizamientos en masa, inundaciones y arrastres de sedimentos, dan lugar a daños en la producción agraria, impactos en núcleos habitados e infraestructuras, colmatación de envases y pantanos y daños en las vías de comunicación.

Equilibrios, umbrales y respuesta no lineal

La dinámica del suelo alcanza un equilibrio con las condiciones ambientales que las actividades humanas pueden alterar significativamente por ejemplo a partir del uso agrario, los incendios forestales, la urbanización o la contaminación. En general y salvo casos extremos, los impactos sobre el suelo son absorbidos por el sistema una vez transcurrido un cierto periodo de recuperación, que varía según las distintas condiciones del medio y del impacto, y el medio edáfico tiende a recuperar las condiciones iniciales de equilibrio. Normalmente el suelo tiene una gran capacidad de recuperación o de resiliencia, pero ante fuertes impactos, presiones repetidas o condiciones climáticas muy desfavorables, esta capacidad de recuperación disminuye. Cuando el suelo recibe impactos reiterados o una mala utilización continuada – como, por ejemplo, por una pérdida sustancial de materia orgánica, extracción significativa de nutrientes o incendios repetidos-, se establece una tendencia de pérdida progresiva de calidad del suelo como medio productivo y de regulación ecológica. Esta situación puede producirse en áreas afectadas por desertificación. A medida que los procesos de desertificación se intensifican, se produce también una espiral de retroalimentación que incrementa la velocidad y las consecuencias de las presiones sobre el suelo. Las situaciones más graves de desertificación empiezan a producirse cuando el sistema sobrepasa una cierta situación límite. A partir de ciertos umbrales de disrupción, ya no se produce una situación de repuesta lineal en la recuperación ante nuevos impactos y puede producirse una situación de cambio convulsivo. En esta situación podemos llegar a estados de irreversibilidad o situaciones de no retorno. Ello ocurre cuando la zona afectada alcanza situaciones de desertificación irreversible, por ejemplo cuando se llega a afloramientos generalizados en paisajes forestales calizos. En la fig. 1 se esquematiza la evolución de este proceso.

En la figura se representa una situación teórica, pero relativamente frecuente en el entorno de zonas forestales españolas, que han sufrido incendios forestales repetidos y también el efecto de lluvias erosivas intensas. El esquema representa en el inicio, una situación estable de un bosque mediterráneo bien estructurado sobre el suelo forestal completo y con un horizonte superficial rico en humus y de buena estructura; a continuación se esquematizan los efectos de procesos erosivos que progresivamente van dismantelando y erosionando el suelo de los horizontes superficiales; finalmente, se observa una situación terminal en la que ha desaparecido el suelo y sólo quedan afloramientos rocosos generalizados del

material calizo subyacente, duro y consolidado. Esta situación final, sin suelo y con el afloramiento rocosos, representa un punto de no retorno o de irreversibilidad. Sería un caso de desertificación extrema.

Impactos *Procesos no lineales*

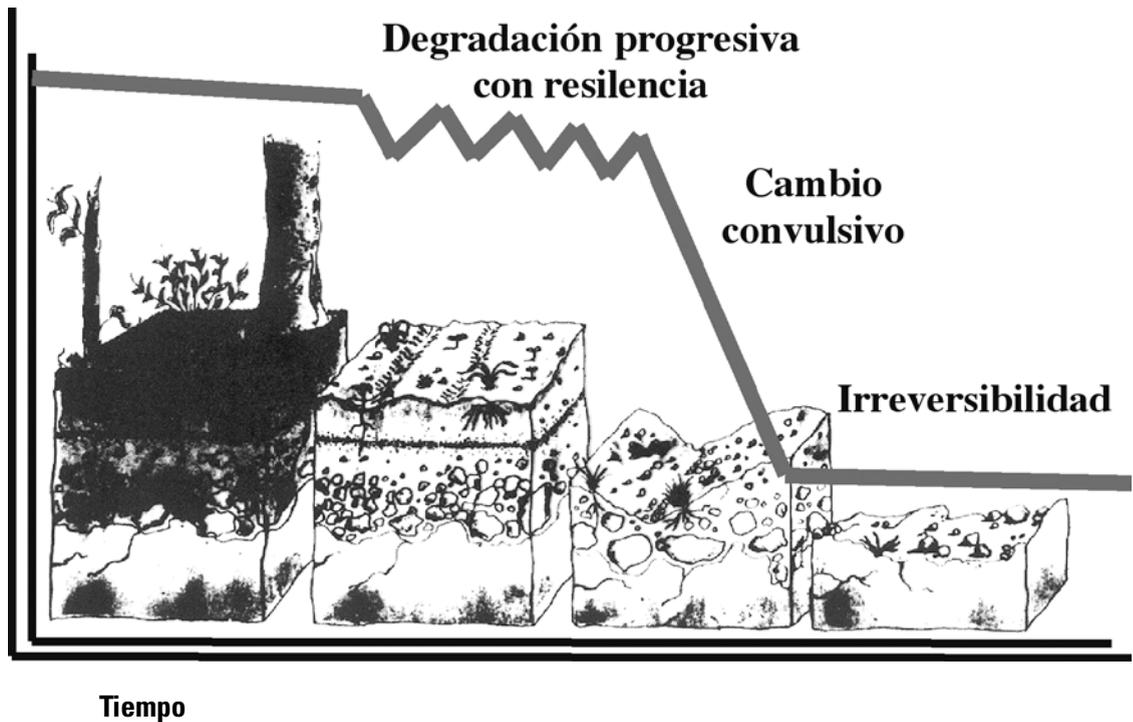


Fig. 1 A partir de un cierto umbral los procesos de desertificación pueden pasar a condiciones de respuesta no lineal o incluso a situaciones de irreversibilidad

Incendios forestales

Actualmente los incendios forestales constituyen uno de los factores más importantes en el incremento del riesgo de desertificación en la cuenca mediterránea. El fuego es un componente natural de los ecosistemas terrestres mediterráneos de los que forma parte contribuyendo al modelado del paisaje y forzando respuestas adaptativas de la vegetación. Desde los tiempos del Neolítico el hombre ha utilizado el fuego con diferentes propósitos. Entre otros, se pueden mencionar la quema del bosque para su aclareo y obtención de espacio para la agricultura, el uso del fuego para actividades cinegéticas, como herramienta agrícola (quema de restos de vegetación y rastrojos), y, en el pasado como ayuda en campañas militares, son algunos de ellos. Pese a la relativa abundancia de actividades de quema, a lo largo del tiempo, en el Mediterráneo el número de incendios forestales se había mantenido en un nivel relativamente bajo que de alguna manera daba opciones a la recuperación de las zonas afectadas. Sin embargo, la situación cambió durante la década de los setenta del pasado siglo. A partir de ese momento, el número de incendios forestales y la extensión de la superficie afectada han crecido enormemente en el sur de Europa. Sólo recién-

temente, y debido a importantes esfuerzos económicos y a la creación de una importante infraestructura humana y de recursos técnicos, la extensión del área afectada muestra una cierta tendencia a disminuir, mientras que el número de incendios muestra una preocupante tendencia de incremento (Fig.2). Es muy probable que la tendencia de calentamiento climático y sus implicaciones de aridificación en el Mediterráneo aumente aun más la incidencia de los incendios forestales. Durante 2005 el área total incendiada en cinco estados europeos mediterráneos (Francia, Grecia, Italia, Portugal y España) fue de 589559 hectáreas. En ese año el número de incendios fue de 73 325. Ambas cifras están muy por encima de los valores promedio de los últimos 26 años (European Communities, 2006)

El registro de datos históricos en el Mediterráneo muestra importantes coincidencias entre los periodos de sequías y el número de incendios forestales. El tremendo incremento de incendios en Portugal durante 2004 y 2005 coincidió con un largo periodo de acusada sequía. Estas circunstancias pueden ser una premonición sobre unas preocupantes perspectivas relacionadas con la tendencia de aridificación climática y sus previsibles consecuencias en el incremento en incendios forestales.

Los incendios forestales son siempre una tragedia biológica. La lenta y laboriosa construcción de un bosque mediterráneo y sus aportaciones de regulación ecológica, de estabilidad y protección del suelo, de contribución paisajista y económica y de mantenimiento de una inmensa variedad de seres vivos, puede desaparecer en cuestión de minutos por la amenaza permanente de los incendios. Tras el incendio, y si éste no ha sido muy intenso y si las condiciones de suelo y orientación son favorables, el sistema inicia una lenta recuperación que puede tardar décadas en retornar a su situación de partida. Esta recuperación lleva normalmente asociada una pérdida de calidad biológica. Después del incendio pueden producirse fuertes procesos de degradación del suelo por fuertes escorrentías, erosión, pérdida de materia orgánica y alteración de las propiedades del suelo (Rubio et al, 2003). Pero habitualmente la recuperación es posible y así se ha ido produciendo a lo largo de los tiempos. Sin embargo hay circunstancias en las que el impacto de los incendios es particularmente dañino afectando a las condiciones de supervivencia de la zona forestal afectada e incrementando el riesgo de desertificación. Estas circunstancias se producen cuando al incendio acompañan otras circunstancias desfavorables. Entre otras podemos considerar aquellas en las que el incendio se produce en áreas con pendientes abruptas; cuando se produce sobre suelos de escasa profundidad, normalmente en roquedos y zonas con abundancia de afloramientos rocosos; cuando los suelos afectados son suelos problemáticos de difícil recolonización por sus propiedades desfavorables; cuando se producen incendios repetidos sobre la misma zona en un corto intervalo de años que no permiten la recuperación del sistema y, por último, cuando un incendio de intensidad elevada en una zona vulnerable es seguido por lluvias de elevada intensidad erosiva.

Condiciones Climáticas

La escasez e irregular distribución, tanto anual como interanual, de las precipitaciones, la torrencialidad y episodios extremos, el desfase entre periodos vegetativos y precipitación en el verano y la incidencia de periodos de sequía, son los principales factores climáticos que, en la región Mediterránea, contribuyen a la degradación de la tierra. Sin embargo durante millones de años el desarrollo biológico, y particularmente la vegetación, han ido adaptándose a estas condiciones climáticas a través del despliegue de toda una serie de impresionantes adaptaciones anatómicas, morfológicas y etiológicas que permiten un equilibrio y una estabilidad que hacen perfectamente viable una cobertura vegetal que además es particularmente rica en biodiversidad y endemismos. Sólo cuando intervienen otros factores perturbadores,

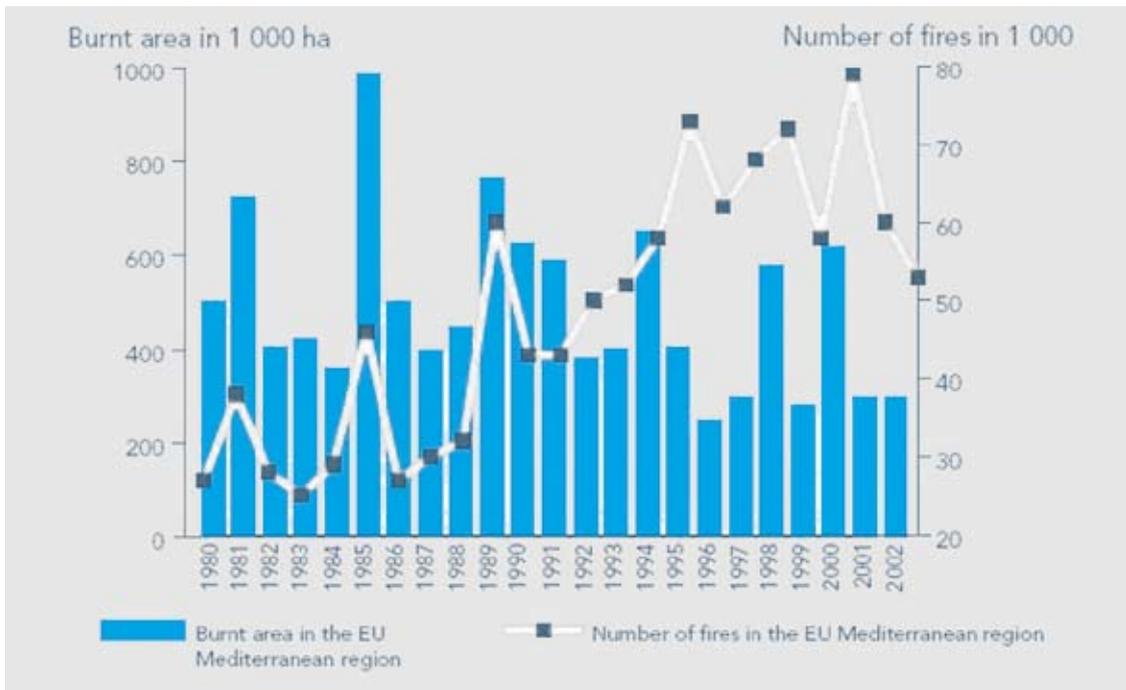


Fig. 2 Número de incendios forestales y área quemada, entre 1980 y 2002, en cinco estados europeos mediterráneos (Francia, Grecia, Italia, Portugal y España)

Fuente: European Commission. Forest Fires in Europe 2002

fundamentalmente humanos, y sobre todo cuando se sobrepasan ciertos umbrales, de desencadenan los procesos de degradación del suelo. La tendencia de cambio climático puede incrementar la presión de los factores climáticos, aumentar la vulnerabilidad y ampliar la extensión de las zonas sensibles que previamente se encontrarían en condiciones de mayor estabilidad. Las condiciones de suelo desnudo en millones de hectáreas de agricultura de secano y la escasa cobertura natural en amplias zonas naturales incrementan los efectos de degradación climática sobre el suelo. En estas condiciones de desprotección, el suelo es más vulnerable a los procesos erosivos y a la desestructuración y arrastre provocados por escorrentías y deslizamientos en masa. También es más sensible a los efectos desecantes de las elevadas temperaturas que aceleran la mineralización de los componentes orgánicos e incrementan los procesos de salinización. Si las condiciones de tendencia climática adversa se mantienen, es de esperar incrementos sustanciales en los efectos destructivos de erosión, colapsos de laderas, aterramientos y pérdida general de calidad biológica del suelo.

Precipitación y aridez

Una característica climática fundamental de gran parte de la región Mediterránea es su déficit hídrico estructural que se produce al tener una evapotranspiración potencial (EPo) mayor que la precipitación (P). La valoración de este déficit hídrico ha sido abordado desde una amplia variedad de índices. Uno de

ellos es el índice bioclimático P/EPo de FAO-UNESCO (1977) que es el utilizado en la definición de desertificación en el CNULCD (Rubio y Recatala, 2006). De acuerdo con esta definición las áreas susceptibles de desertificación se incluyen dentro de las tres categorías siguientes:

Las zonas áridas: $0.03 < P/ET_o < 0.20$

Las zonas semiáridas: $0.20 < P/ET_o < 0.50$

Las zonas seco subhúmedas: $0.50 < P/ET_o < 0.75$.

Así pues una determinada puede sufrir procesos de desertificación cuando se encuentre dentro del rango: $0.03 > P/ET_o > 0.75$

La aridez es una característica esencial en la configuración de la cobertura vegetal mediterránea y en la dinámica y características de los suelos mediterráneos. La escasa disponibilidad de reservas hídricas es un factor limitante que impone fuertes restricciones al desarrollo de la vegetación. Sin embargo a lo largo de millones de años de adaptación evolutiva, la vegetación mediterránea ha ido desarrollando la fascinante gama de adaptaciones que hemos comentado y que le permite una sorprendente capacidad de resistencia y supervivencia al impacto de sequías y también al impacto de largos meses estivales con escasa precipitación y con muy elevadas tasas de evapotranspiración. Sin embargo el escaso y disperso desarrollo de cobertura vegetal en extensas zonas deja al suelo desprotegido y directamente bajo el impacto de la erosividad de la lluvia, la insolación y la acción desecante y erosiva de vientos y otros factores climáticos.

La información acumulada a lo largo del tiempo en distintas zonas de la cuenca mediterránea muestra que un volumen de precipitación promedio anual entre 300 y 350 mm se asocia a importantes procesos erosivos. Por debajo y por encima de estas cantidades la producción de sedimentos se atenúa. Por supuesto la distribución anual y la variabilidad afectan a esta pauta general y de hecho en algunas situaciones una fuerte precipitación aislada de elevada torrencialidad puede contribuir por sí sola con un porcentaje muy elevado de la producción total anual de sedimentos. La tendencia general es que la producción de escorrentía y sedimentos va aumentando con el aumento de precipitación hasta esa zona de 300-350 mm, a partir de la cual empiezan a descender. En general, este descenso en la intensidad de los procesos erosivos se asocia a un incremento en el porcentaje y densidad de la cobertura vegetal que actúa eficazmente en la protección y conservación del suelo. En efecto, desde situaciones de menos de 150 mm, con una escasísima cobertura de vegetación aislada, se pasa progresivamente a coberturas de matorral disperso. A medida que aumenta la disponibilidad de humedad por aumento de precipitaciones, la cobertura de matorral y arbustivas puede evolucionar a bosquetes abiertos mixtos y, finalmente y con adecuadas condiciones de suelo, se puede alcanzar el desarrollo de un bosque mediterráneo más o menos cerrado y estructurado, que proporciona la máxima protección frente a los procesos erosivos. Ésta es la tendencia general en las condiciones más o menos naturales de las zonas mediterráneas no cultivadas, es decir, zonas forestales y zonas marginales sin una utilización productiva determinada. En estas condiciones la adaptación evolutiva entre suelos, geomorfología y cobertura vegetal muestra una eficacia sorprendente en el control de la erosión. De hecho y en función de nuestra experiencia práctica y experimental, los rasgos erosivos más destacados e intensos del paisaje mediterráneo casi siempre se asocian a intervenciones humanas en el uso del territorio y raramente son visibles en condiciones "naturales". La expansión agrícola a zonas marginales y en pendiente, su posterior abandono y abandono del mantenimiento de las estructuras de conservación de suelo y agua, las obras civiles y de comunicación, los incendios forestales, las expansiones urbanas e industriales, la minería y actividades extractivas y las

malas prácticas agroforestales, en general son las responsables de la ruptura de equilibrios adaptativos naturales y del desencadenamiento de procesos erosivos. Así, el impacto humano se superpone a condiciones climáticas y terrestres limitantes. La variabilidad y escasez general de precipitaciones, junto a una fuerte evapotranspiración, reduce drásticamente las reservas de agua que debe almacenar el suelo para el desarrollo de la vegetación y para la propia dinámica edáfica. El resultado es una producción limitada de biomasa y también una limitada incorporación de restos vegetales al suelo. Ello origina niveles limitados de un componente esencial para el suelo como es la materia orgánica, responsable, entre otros aspectos, de la fertilidad, la actividad biológica, y la resistencia y estabilidad del suelo frente a los procesos erosivos, por el desarrollo de una buena agregación y estructura. En estudios (Kosmas *et al.*, 1993) realizados para determinar el efecto de la disminución de la humedad del suelo sobre las propiedades edáficas y sobre la producción de biomasa, se indica que la producción de trigo de secano se reducía proporcionalmente a la reducción de precipitación en los experimentos de exclusión de agua de lluvia.

Implicaciones entre cambio climático y desertificación

Existen efectos de doble sentido entre desertificación y tendencia de cambio climático: el clima incide en los procesos de desertificación y las áreas degradadas contribuyen a exacerbar la incidencia de algunos parámetros en la tendencia de calentamiento.

Hasta ahora hemos visto las importantes implicaciones de algunos factores climáticos (precipitación, temperatura, evapotranspiración, erosividad de la lluvia, sequías) como desencadenantes de procesos de desertificación. Pasaremos a comentar ahora algunos de los mecanismos de retroalimentación que se producen en las áreas afectadas por desertificación y sus efectos sobre determinados parámetros climáticos y algunos sistemas de regulación climática.

El suelo como membrana biológica que cubre la superficie de las tierras emergidas del planeta recibe e interacciona con la atmósfera y también recibe radiaciones que son modificadas al incidir sobre su superficie. Constituye un emisor y un sumidero de importantes gases y materiales con efecto invernadero. Entre otros: vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, elementos traza, aerosoles y partículas de polvo.

Estas funciones reguladoras de factores con incidencia en el clima se ven afectadas negativamente bajo los impactos de periodos de sequías y muy probablemente bajo la tendencia de aridificación. Una disminución en el potencial del sistema suelo como soporte de funciones de regulación climática conllevaría a procesos de readaptación de la vegetación en su conjunto a las nuevas circunstancias, con disminución de la cobertura vegetal y también con pérdida de biodiversidad, al situarnos en medios con parámetros físicos, químicos y biológicos alterados. La regulación del suministro y reserva de agua, el aporte de nutrientes y la degradación estructural serían algunas de las circunstancias edáficas que incidirían en los niveles de cobertura de la vegetación y de riqueza en biodiversidad. Ésta se vería afectada por la disminución del número y diversidad de las especies, dificultades en la nascencia y germinación, reducción en la autocolonización, etc.

Si disponemos de información sobre el incremento de riesgo de degradación del territorio como consecuencia de la tendencia de cambio climático, el proceso inverso, es decir, las implicaciones de las zonas degradadas en cuanto a acelerar la tendencia de calentamiento, es un tema mucho menos conocido, pero no por ello menos importante y con múltiples consecuencias todavía no bien evaluadas.

La superficie del suelo es la interfase crítica entre las interacciones desertificación- cambio climático. En la superficie del suelo de las zonas degradadas se producen cambios que afectan a las características de albedo, al balance de radiaciones, al balance térmico, a procesos de criptoprecipitación y al régimen de humedad.

Con relación a las características de albedo, en las zonas degradadas o desertificadas, tiende a producirse un cambio de color hacia tonos más claros por disminución de la cobertura vegetal, por disminución del mantillo u hojarasca superficial, por pérdida de materia orgánica del suelo o por características propias del suelo que con frecuencia en estas zonas degradadas puede ser margoso, blanquecino-grisáceo o incluso con eflorescencias salinas superficiales. Los tonos más claros implican aumento de albedo, es decir, aumento en la reflexión de las radiaciones que inciden sobre la superficie del suelo. Según la hipótesis de Otterman (1974) y Charney (1975), este cambio de albedo tiene repercusiones en el régimen de precipitaciones de carácter local que puedan producirse en la zona. Según esta hipótesis, el aumento de albedo induce una reducción neta en la emisión de radiaciones de onda corta. Ello tiende a inducir un enfriamiento de la superficie del suelo que incrementa los procesos de subsidencia. A su vez, ello origina reducción en la convección y en la formación de nubes. Como consecuencia de esta reducción en la inestabilidad atmosférica, se reducen las posibilidades de precipitación en la zona.

Lo contrario sucede con el aumento de albedo, es decir, con la disminución de la reflexión. Esta circunstancia corresponde a colores más oscuros en la superficie del suelo, como pueden ser las situaciones de una densa cobertura vegetal, la presencia de abundante mantillo superficial o la existencia de un horizonte superficial edáfico rico en humus y como consecuencia de color negro o parduzco-oscuro. Evidentemente estas características no corresponden a zonas desertificadas sino todo lo contrario. En estas situaciones de escaso albedo, se produce un mayor calentamiento de la superficie del suelo que tiende a incrementar los procesos de convección. A su vez, este aumento de inestabilidad incrementará las posibilidades de precipitación en la zona.

Así pues, lo que se desprende de la hipótesis de Otterman-Charney es que muy probablemente las zonas desertificadas incrementen aún más sus riesgos de desertificación al originar circunstancias que disminuyen las posibilidades de recibir las vitales precipitaciones que aliviarían la espiral de degradación. Por el contrario, las zonas estables, fértiles y con buena cobertura de vegetación tienen más posibilidades de incrementar sus niveles de reservas hídricas.

Otro efecto de las distorsiones en el balance de flujos de energía y de compuestos en la superficie del suelo de las zonas degradadas, es el aumento del rango de oscilaciones diarias y estacionales de las temperaturas en la superficie del suelo. Ello origina saltos térmicos importantes que afectan negativamente a la actividad biológica. Entre otros aspectos pueden originar dificultades en la capacidad de regeneración de la cobertura vegetal por mayor stress térmico.

Cualitativamente son también importantes los aportes hídricos derivados de fenómenos de condensación. La disminución de la vegetación en las zonas degradadas reduce el estratégico aporte de las llamadas precipitaciones horizontales o criptoprecipitaciones, al disminuir las superficies disponibles de condensación que pueden obtener los aportes de rocío, neblinas, o situaciones de elevada humedad atmosférica. Si bien en el volumen total estas precipitaciones son poco importantes, su contribución puede en algunos casos aportar la necesaria humedad que pueda significar la diferencia entre supervivencia o marchitamiento irreversible de la vegetación.

Existen otras numerosas funciones y procesos que influyen al menos en los parámetros microclimáticos de las zonas con suelo degradado, y que inciden en la tendencia de cambio climático. Quizás una de las más importantes sea la que se refiere al papel del suelo como regulador del ciclo de numerosos gases con efecto invernadero, entre otros el CO_2 .

El suelo es un depósito natural de cantidades ingentes de carbono orgánico. Se considera que el suelo constituye, después de los océanos, el regulador o sumidero de CO_2 más importante del planeta. Se estima en unos 55 billones de toneladas el carbono orgánico acumulado en el conjunto de los suelos terrestres. Este depósito global de carbono se ha ido produciendo por la acumulación a lo largo de millones de años del mantillo y del humus incorporado en el interior del perfil del suelo a partir de la descomposición de todo tipo de restos vegetales, que previamente absorbieron CO_2 como consecuencia del proceso de fotosíntesis. Comparativamente, se estima en unos 5-6 billones de toneladas la combustión anual de carbono por distintos procesos industriales, transporte, calefacción, etc.

Estas cifras hablan por sí solas y destacan el papel del suelo como emisor y fijador (sumidero) de uno de los gases con mayor efecto en el proceso de calentamiento global. Por otra parte, si en condiciones normales el sistema suelo actúa regulando y amortiguando el ciclo del carbono, cuando el suelo se degrada el equilibrio se altera y se propicia la emisión a la atmósfera de cantidades que, a nivel global, se estiman en más de la mitad del carbono emitido por la actividad de los países industrializados anualmente.

La degradación del suelo y la pérdida de carbono se produce a través de numerosos procesos de desertificación que incluyen, entre otros: prácticas agrícolas inadecuadas (exceso de quema de rastrojos, laboreo excesivo) forestales (rozas, eliminación del matorral, incendios), erosión del suelo (por ejemplo en la agricultura de secano abandonada), obras públicas mal planificadas, inadecuada ordenación del territorio, etc. que ya hemos comentado. En condiciones naturales o en condiciones de utilización adecuada del suelo éste emite continuamente flujos de CO_2 derivados de la actividad biológica de microorganismos, de descomposición de restos vegetales y de la propia actividad de los sistemas radiculares. A este flujo de CO_2 se le denomina respiración del suelo y en condiciones normales se estima en 4-5 % anual del carbono incorporado al suelo. Sin embargo la degradación del suelo puede representar un incremento espectacular de estas emisiones por un aumento en la aireación e insolación como consecuencia de una mayor exposición al erosionarse o desmantelarse el perfil del suelo. Se estima que la emisión desde el suelo de dióxido de carbono como consecuencias de procesos de degradación puede representar el 20% anual de la combustión de combustibles fósiles.

Otro gas con importante efecto invernadero lo constituye el metano. Se considera que un 70% del metano atmosférico procede del suelo. Existen enormes acumulaciones de metano retenidos en los suelos de permafrost de latitudes boreales como la región siberiana. La tendencia de calentamiento podría conducir a procesos de deshielo que darían lugar a enormes emisiones de un gas que tiene un efecto invernadero cuatro veces superior al dióxido de carbono. En latitudes más meridionales, la alteración y desecación de zonas húmedas y pantanosas podría también contribuir al incremento de estas emisiones.

Existe otra importante interacción entre suelo y compuestos gaseosos nitrogenados que fundamentalmente deriva del uso de fertilizantes de nitrógeno y algunos procesos edáficos. Se estima que un noventa por cien del óxido nítrico atmosférico procede del suelo.

Con relación al amoníaco emitido desde el suelo, éste deriva de las características de elevada volatilidad del ión amonio en condiciones alcalinas. Cuando el agricultor utiliza abonos amoniacales en condiciones de suelos calizos de pH elevado, que son particularmente elevados en nuestro entorno, se

producen abundantes pérdidas por volatilización de amoníaco que escapa directamente a la atmósfera en cantidades que pueden llegar a alcanzar el cuarenta por ciento del amonio aportado al suelo.

Otro proceso de emisión de compuestos nitrogenados desde el suelo a la atmósfera lo constituyen los procesos de desnitrificación. También derivan de la utilización de fertilizantes nitrogenados, y, aunque en menor escala, también pueden producirse en condiciones naturales. El proceso de desnitrificación consiste en la transformación de nitratos y nitritos del suelo en nitrógeno gaseoso y liberados a la atmósfera debido a la acción de bacterias heterótrofas que son abundantes en el suelo en condiciones anaerobias (suelos inundados, encharcamientos). La desnitrificación representa un cambio importante en la dinámica del nitrógeno de los fertilizantes nitrogenados. En las condiciones habituales de suelos aireados, las transformaciones del nitrógeno aplicado conducen a la producción de nitritos y nitratos, debido a la acción de bacterias de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Por el contrario, en los suelos inundados, por ejemplo en los arrozales, las formas amoniacaes no pasan a nitratos mientras el suelo se mantenga en condiciones anaerobias. Si se producen fases de aireación, los nitratos que se produzcan en estos periodos pueden sufrir pérdidas gaseosas por desnitrificación en las fases subsiguientes de inundación y, como se ha indicado, pueden sufrir pérdidas gaseosas.

La disminución en materia orgánica del suelo puede incrementar la vulnerabilidad del suelo a la erosión, a los procesos de encostramientos y compactaciones y a otros procesos degradativos. Con relación a factores climáticos los procesos de erosión eólica que se incrementan apreciablemente en suelos con escasa materia orgánica y desestructurados, son de particular importancia. Sus efectos derivan de la transferencia a la atmósfera de partículas del suelo (arcillas, limos, restos orgánicos) que se mantienen en suspensión y que pueden afectar a las características de las radiaciones en la atmósfera y al régimen de temperaturas por fenómenos de oscurecimiento atmosférico. El desierto del Sahara y su entorno constituyen un formidable emisor de polvo atmosférico que afecta a enormes extensiones y distancias sobre la superficies terrestre (Midleton, 1997).

Conclusiones

Los procesos de desertificación incluyen importantes parámetros climáticos como principales mecanismos de desencadenamiento de procesos de degradación. Estos parámetros se relacionan con la temperatura, precipitación, erosividad de la lluvia, evapotranspiración, radiaciones, variabilidad climática y sequías.

En las zonas sometidas a desertificación, el suelo progresivamente pierde su capacidad de soporte de la producción de biomasa y también paulatinamente pierde sus funciones ecológicas incluyendo la regulación de gases con efecto invernadero o la regulación de parte del ciclo hidrológico.

La estructura del suelo constituye una propiedad crucial del suelo que además es muy vulnerable a las variaciones climáticas y a la disponibilidad hídrica debido a su importante componente biológica.

Existen importantes mecanismos de retroalimentación entre la tendencia de calentamiento climático y los procesos de desertificación, entre los que se incluyen los cambios de albedo, emisión y secuestro de gases con efecto invernadero, cambios en los balances de las radiaciones, pérdida de la capacidad de proporcionar cobertura de vegetación, emisión de partículas de polvo y aerosoles y, cambios en el régimen de evapotranspiración.

Particularmente el deterioro del suelo por procesos de desertificación puede liberar enormes cantidades de CO_2 . Por ello y a la inversa, protegiendo y conservando el suelo podemos contribuir a mitigar el cambio

climático. En la cuenca mediterránea y particularmente en España, ambos problemas, degradación del suelo y cambio climático, son importantes y sus consecuencias requieren una prudente y activa implicación por parte de los órganos de administración, de la comunidad científica y de toda la sociedad en su conjunto.

Hoy día y más que nunca la preocupación ambiental está presente en la sociedad. Sería deseable que a partir de una mayor información y percepción de la dimensión y consecuencias de la problemática ambiental ligada al cambio climático, se pasara a actitudes más participativas y comprometidas. Existe una dimensión internacional que exige a nuestros representantes oficiales a una participación activa en el debate mundial de cómo luchar contra el cambio climático y de abordar planteamientos globales tales como la necesidad de cambio en el modelo energético, la lucha contra la desertificación o la ecoeficiencia energética.

Pero también podemos y debemos actuar mitigando los efectos del cambio climático a nivel local y en nuestro propio entorno. Existe la posibilidad cercana e inmediata que consiste en la conservación y protección de algo que tenemos más a mano: nuestra tierra, nuestro paisaje y nuestro territorio.

References

- European Communities (2006) Forest Fires in Europe 2005. European Commission, Joint Research Centre
- Charney, J. G. (1975) Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101, 193-202.
- Francis, C. F. and Thornes, J.B., (1990). Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. In: J.B. Thornes (editor), *Vegetation and Erosion, Processes and Environments*. J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 363-384.
- Kosmas, C, Danalatos, N., Moustakas, N., Tsatiris, B., Kallianou, Ch. and Yassoglou, N. (1993). The impacts of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semi-arid conditions. *Soil Technology* 6:337-349.
- Lal, R. (2001) Potencial of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change* 51, 35-72
- Middleton, N. (1997) Desert Dust. In: *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*, J. Wiley & Sons. 413-436.
- Otterman, J. (1974) Baring high-albedo soils by overgrazing: A hypothesized desertification mechanisms. *Science* 186, 531-33
- Rožanov, B.G., Targulian, V. y Orlov, D.S. (1990) Soils en The Earth as transformed by human actions: global and regional changes in the biosphere over the past 30 years, Turner, B.L. et al. (eds). Cambridge University Press.
- Rubio, J.L. (2007) Agua y desarrollo en un mundo bajo amenaza de desertificación. En: R. Tamames (ed.) *La difícil supervivencia de la especie humana. Ecología y Globalización*. Ediciones 2010. Madrid
- Rubio, J.L., Andreu, V., Gimeno-García, E. (2003). Caso Práctico: Diseño y funcionamiento de una Estación Experimental para el estudio del efecto de los incendios forestales sobre el suelo, los procesos erosivos y la vegetación. En: *La Ingeniería en los Procesos de Desertificación*. Madrid: Grupo Tragsa, pp. 249-274.

Rubio, J.L. and Recatala, L. (2006) The relevance and consequences of Mediterranean desertification including security aspects. En: Desertification in the Mediterranean Region: a Security Issue. Valencia NATO Workshop, Springer.

UNEP (1992) World Atlas of Desertification, Edward Arnold.

Van Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazábal, C. y Selvaradjou, S.K. (2004) Reports of the Technical Working Groups established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/1-6, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 872 pp.

Williams, M. A. J. and Balling, R. C. (1996) Interactions of desertification and climate. Arnold

CAPÍTULO 4

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SALUD HUMANA

Joan O. Grimalt

*Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona. Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Premio Rey Jaime I a la Protección del Medio Ambiente 2005*

Introducción

Los informes del Panel Internacional sobre el Cambio Climático proporcionan una evidencia muy clara de que éste está en marcha y de, por encima de la variabilidad natural, se observa una influencia de la acción humana. Según las estimaciones de dicho Panel la temperatura planetaria media de la atmósfera en el intervalo 1850-1899 es 0.76°C más elevada que la equivalente del intervalo 2001-2005. Por otro lado, doce de los trece años comprendidos en el intervalo 1995-2006 se encuentran entre los años más cálidos, de acuerdo con las medidas instrumentales realizadas desde 1850. Según estas medidas, el año 2005 fue el más caliente desde la fecha anteriormente mencionada (datos disponibles en la página web de la NOAA). Las estimaciones del Panel y de la mayoría de investigadores en el tema indican que unos 0.6°C de dicho incremento son atribuibles a la acción humana mientras que el resto reflejaría una evolución natural.

Estos datos muestran por si mismos que estamos ante una cuestión importante. Sin embargo, si se comparan con el registro histórico obtenido a partir de los anillos de los árboles se observa que estos años tan calientes de principios del siglo XXI han sido los más calientes en el hemisferio norte de los últimos 1000 años (*Mann et al.*, 1999) o de los últimos 2000 años (*Mann et al.*, 2003). El incremento observado en la temperatura atmosférica es paralelo al aumento de concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera a partir de la revolución industrial. Dichos gases de efecto invernadero tienen la propiedad de aumentar la temperatura en la troposfera, donde son introducidos, porque absorben la energía electromagnética reemitida por la Tierra al ser irradiada con luz solar y son transparentes a esta última.

El calentamiento antes mencionado se está manifestando en un cambio importante de las condiciones climáticas en muchas zonas del planeta. Así, se están fundiendo los hielos de las montañas, se

produce una variación del régimen estacional, con tendencia al adelanto de la primavera y retraso del invierno, los lagos de zonas frías se congelan más tarde y se descongelan antes, se funden los suelos congelados (permafrost) de Siberia y el Canadá, en verano se descongela una parte importante de los hielos de Groenlandia y el polo norte y aumenta el nivel del agua del mar debido a la expansión térmica de los océanos y las contribuciones de la fusión de los hielos continentales. Todos ellos son efectos medidos. La relevancia de estos cambios es muy importante en el caso de la fusión de los hielos de las montañas, donde se observa un retroceso de los glaciares y las zonas de nieves perpetuas.

Sería erróneo minimizar el problema porque *todavía* no es muy significativo en varios de los aspectos antes mencionados. Hay que tener presente que, dentro de la variabilidad natural, la tendencia no es reversible, y desde luego no sin cambiar sustancialmente la emisión de gases de efecto invernadero. Además, el término *importancia* es relativo y condicionado a lo que se valore. De acuerdo con el Panel Internacional sobre el Cambio Climático, lo más probable es que los cambios que observaremos en el futuro sean mucho más serios que los actuales, y existen diversos informes que indican que las predicciones realizadas por dicho Panel son muy, demasiado, comedidas (*Rahmstorf et al., 2007*).

En este contexto, cabe plantearse si el cambio climático puede afectar a la salud humana y mediante qué procesos. En general, éste puede dar lugar a fenómenos tales como choque de calor y otros efectos relacionados con la temperatura, extensión y actividad de los portadores de enfermedades infecciosas y de los patógenos que las causan (cambios en extensión geográfica e incidencia en las enfermedades transmitidas por los portadores), alteraciones de la ecología local de los agentes infecciosos de agua y de los alimentos (diarreas y otras enfermedades infecciosas), alteraciones de la productividad alimentaria (malnutrición, hambre, desarrollo de los niños), sequías e inundaciones (cantidad y calidad aguas dedicadas al consumo humano, incremento de patógenos), subidas del nivel del mar (desplazamiento de poblaciones), aumento niveles contaminación biológica del aire (polen, esporas, asma, alergias, rinitis), dislocaciones sociales, económicas y demográficas (*Sunyer y Grimalt, 2006*).

En este trabajo se describirán diversos casos en los que a la vista de los datos disponibles existe una relación clara entre episodios atribuibles al cambio climático y efectos negativos sobre la salud humana. Por otro lado, se discutirán algunos de los riesgos principales de extensión de enfermedades que pueden estar relacionados con el cambio climático, con especial énfasis en la situación europea y española.

Resultados

Dentro del contexto expuesto anteriormente, centrándonos más en los aspectos relacionados con enfermedades en lugar de los problemas de salud derivados de catástrofes, como por ejemplo huracanes, incendios, sequías, etc., se pueden considerar los siguientes apartados:

- efectos directos de temperatura
- enfermedades bacterianas
- enfermedades transmitidas por vectores (artrópodos)
- alergias

A continuación veremos diversos ejemplos de ellos, que se describirán siguiendo investigaciones recientes acerca de los mismos.

Efectos directos de temperatura

Tal como se ha dicho en la introducción, el incremento actual de temperatura planetaria media anual en la atmósfera debido a la acción humana es de 0.6°C y la combinación de datos instrumentales y dendografía nos indica que dicha temperatura ha sido la más alta prácticamente de los últimos dos milenios (obsérvese que en este período también queda incluido el óptimo medieval y el período cálido observado durante la civilización romana). Este incremento puede parecer poco importante. Sin embargo hay que tener en cuenta que el clima tiene una alta variabilidad geográfica y temporal. Entorno a valores medios se pueden producir desviaciones regionales muy significativas.

Una de ellas se produjo en el verano del año 2003 en Europa. La combinación de datos instrumentales y dendografía ha mostrado que dicho verano fue el más caliente de los últimos 500 años en Europa (Luterbacher *et al.*, 2004). En dicho período se produjeron desviaciones positivas de temperatura respecto a los valores medios mensuales locales (Julio y Setiembre) de hasta 7°C en Francia y en Suiza (en España de hasta 5°C). Las desviaciones positivas medias del verano fueron de 6°C en amplias zonas de Francia (en España de $3-4.5^{\circ}\text{C}$ y en las zonas norte de Catalunya y Aragón de 6°C). Hay que decir, sin embargo, que estas temperaturas sólo fueron excepcionales para el período veraniego. Si se considera la media anual, las temperaturas observadas no destacan especialmente. Ello pone de manifiesto, de nuevo, la incertidumbre asociada al concretar en escalas temporales y geográficas pequeñas los efectos generales del cambio climático.

Las desviaciones de temperatura importantes con respecto a la temperatura media tienen un efecto directo sobre la salud de la población. Hay que hacer notar que el factor significativo son las desviaciones sobre la temperatura media y no los valores absolutos. Ello se debe, fundamentalmente, al hecho de que la población ya tiene unos hábitos de vida adaptados a la climatología del área en la que vive. Por tanto está adaptada a sus temperaturas. El problema surge cuando hay desviaciones de dichas temperaturas que imprimen al entorno demasiado calor o demasiado frío. Se ha observado que las desviaciones entorno del percentil 5% tanto en positivo (calor) como en negativo (frío) producen aumentos de mortalidad en la población expuesta. Dichos aumentos son debidos a causas orgánicas, circulatorias y respiratorias y afectan fundamentalmente a las personas mayores de 65 años. Obviamente, los sujetos con un estado de salud general más precario son las más susceptibles de sufrir estos problemas. En epidemiología, la incidencia de mortalidad asociada a este tipo de problemas se denominan con el término de *efecto cosecha*.

Los aumentos de temperatura (olas de calor) suelen tener un efecto más importante en plazos de tiempo más breve que los derivados de fríos extremos. Estos efectos son de tipo logarítmico. Para mantener la mortalidad observada en los primeros días de una ola de calor se tienen que producir incrementos de temperatura siguiendo esta función. Por tanto, ante un evento de este tipo es fundamental la prevención y la capacidad de actuación temprana. Es necesario mantener las poblaciones de riesgo con un buen nivel de hidratación y en ambientes frescos. La OMS atribuye unas 150000 muertes anuales durante los últimos 30 años a estos efectos de ola de calor (Patz *et al.*, 2005). Las *islas de calor* que generan las ciudades en general contribuyen a aumentar el problema.

Volviendo al caso que nos ocupa del verano del año 2003, en la Tabla 1 se detallan los incrementos de mortalidad observados en diferentes países europeos debidos a la ola de calor antes mencionada (Díaz Jiménez, 2005; Kosatsky, 2005). Los incrementos observados son importantes. En Francia se tuvieron que implementar sistemas complementarios ante el colapso de los servicios mortuorios. Hay que tener en cuenta que los incrementos descritos en la Tabla 1 se produjeron en países cuyo sistema sanitario es muy

eficiente en comparación con los servicios de salud de la mayoría de países del mundo. Ello permite deducir de forma todavía más clara el gran impacto que tuvo esta ola de calor sobre la salud de los europeos.

Tabla 1. Incrementos de mortalidad en diversos países de Europa producidos en la ola de calor del verano del 2003

País	Exceso de mortalidad	Periodo reportado
Francia	14800	1-20 Agosto
Italia	4175 (> 65 años)	15 Julio – 15 Agosto
Portugal	1316	31 Julio – 12 Agosto
Reino Unido	2045	4-13 Agosto
España	6000	Julio-Agosto
Europa	22000-45000	1-20 Agosto

Afortunadamente, la ola de calor europea del verano de 2003 no se ha vuelto a repetir. El verano de 2007 (cuando se escribe el presente trabajo) ha sido relativamente fresco en España. Sin embargo, el invierno de este último año fue más bien cálido en toda Europa. Ello no se ha traducido en un verano con desviaciones positivas de temperatura. Todo ello muestra la incertidumbre asociada a la concreción espacio-temporal del cambio climático general. De todos modos, es obvio que un efecto de calentamiento global tiene que dar lugar a una mayor frecuencia de episodios de ola de calor como la vivida, que quizá sean de mayor intensidad. Ello plantea un reto para las autoridades sanitarias de todos los países. No obstante, el reto mayor es para la población mundial. Es necesario corregir de manera inminente el modelo de desarrollo que está provocando este cambio climático.

Enfermedades bacterianas

En este apartado consideraremos dos enfermedades sobre las que se ha documentado una incidencia clara relacionada con efectos climáticos, el cólera y la salmonelosis.

Cólera

Enfermedad producida por la bacteria *Vibrio cholerae* y que está altamente relacionada con la disponibilidad de agua de buena calidad sanitaria. Hace 50 años esta enfermedad desapareció en los países desarrollados. En la actualidad, las diarreas, y por extensión el cólera, son enfermedades que usualmente están asociadas a la pobreza, el hacinamiento y la contaminación de las aguas (Colwell, 1996). Según datos de la OMS, un 15-30% de los niños menores de 5 años (alrededor de 3 millones de individuos) mueren anualmente por trastornos diarreicos. Afortunadamente, la mejora en los servicios sanitarios ha dado lugar a que la mortalidad por estas enfermedades haya decaído en los últimos 20-30 años, aunque no su incidencia. Contrariamente, se ha observado una re-emergencia de cólera a nivel mundial, con importantes

casos documentados en Libia y Etiopía (1970), Australia (1978), Países del Caribe (1978), México, Perú y Brasil (1991), India y Bangladesh (1992), entre otros.

Estudios recientes sobre la incidencia mensual de cólera en Bangladesh durante los últimos 18 años han mostrado que esta enfermedad tiene una asociación con la frecuencia de El Niño (*Pascual et al.*, 2000). Una re-evaluación posterior de la incidencia de cólera en dicho país ha mostrado que ésta está relacionada con la recurrencia de varias cepas del patógeno (clásica y El Tor, fundamentalmente). Se observa una variabilidad interanual en periodos de más de siete años que tiene una fuerte correspondencia con las lluvias y las descargas del río Brahmaputra (relacionados con los monzones) y unos periodos más cortos (menores de siete años) que están relacionados con la variabilidad del Niño y su influencia en la temperatura (*Koelle et al.*, 2005). Estudios realizados en otros países, por ejemplo Gana (*Constantin de Magny et al.*, 2006), también han mostrado una asociación entre incidencia de cólera y variaciones climáticas. En Perú también se ha relacionado la incidencia de diarreas con el Niño (*Cheekley et al.*, 2005).

Salmonellosis

Esta enfermedad se debe a la contaminación de los alimentos por las bacterias del grupo *Salmonella*. Producen diarreas graves que pueden dar lugar a necrosamiento de parte del intestino. Datos combinados de Chequia, Dinamarca, Estonia, Polonia, Holanda, Eslovaquia, España, Suiza y el Reino Unido muestra que a una temperatura por encima de 5°C se produce un incremento del 5–10% de infección por *Salmonella* para cada grado centígrado de aumento en temperatura media semanal. La temperatura influyó en la transmisión de la infección en un 35% de los casos de salmonelosis de Chequia, Inglaterra, Holanda, Polonia, España y Suiza.

El control y vigilancia de la cadena alimentaria son cruciales para evitar la incidencia de la enfermedad. La mejora de la legislación sobre almacenamiento y refrigeración pueden ayudar a prevenir la salmonelosis en los casos asociados con cambios climáticos. En algunos países el número de infecciones disminuye, lo que muestra que las políticas sanitarias pueden ser efectivas. En España la ley ordena que los elaboradores de alimentos (por ejemplo pastelerías) y los restauradores (por ejemplo, bares, restaurantes, etc) no utilicen huevos sino derivados de éstos (ovina) para elaborar sus productos o alimentos preparados con el fin de evitar contaminaciones por *Salmonella* sp.

Enfermedades transmitidas por vectores (artrópodos)

Existe un amplio grupo de enfermedades producidas por agente patógenos, bacterias, virus o eucariotas, que se transmiten por un vectores (artrópodos, moluscos, etc.) y en donde participa un huésped. El vector, el huésped o ambos pueden actuar de reservorio. Uno de los ejemplos más claros y dramáticos de este tipo de enfermedad lo constituye la peste negra (o bubónica) que en el siglo XIV dio lugar a la extinción de un tercio de la población europea. Dicha enfermedad fue causada por la bacteria *Yersinia pestis* que se transmitía por las pulgas desde la rata negra (*Rattus rattus*), que actúa de reservorio. Sin embargo, no se puede hablar de la peste negra sin indicar que esta tragedia fue acompañada por el horror de la persecución por parte de los cristianos-católicos de las comunidades judías que habitaban en las ciudades europeas, a las que se les atribuyó el origen de la enfermedad por envenenamiento del agua. Ello constituye un ejemplo claro de interpretación torcida de los hechos (los individuos de dichas comunidades también sufrían las consecuencias de la enfermedad) y como consecuencia de ello en muchas ciudades se eliminó a los colectivos judíos. En aquellos tiempos oscuros los promotores del enfrentamiento entre

comunidades, los embusteros y los falseadores de la realidad obtuvieron grandes éxitos. Lástima que en el 2007 dichas palabras sean tan actuales.

La permanencia del patógeno en el reservorio depende de la temperatura y a veces de la humedad. El clima influye de forma decisiva sobre la fenología de una gran parte de artrópodos que pueden entrar en letargo (diapausa) en la estación desfavorable.

La temperatura influye de forma específica en la supervivencia del vector, la tasa de crecimiento de sus poblaciones, su susceptibilidad a los patógenos, su período de incubación extrínseca (tiempo que tarda el artrópodo desde que se infecta hasta que puede infectar) y su actividad y patrón de transmisión estacional.

En general, en el caso de los insectos, a mayor temperatura del agua las larvas de los mosquitos tardan menos tiempo en madurar, aumenta el número de crías durante la estación de transmisión, se acorta el período de metamorfosis huevo-adulto (reduciéndose el tamaño de las larvas), y se generan adultos en un tiempo más corto (que también son más pequeños). Ello suele dar lugar a que las hembras tomen sangre con más frecuencia para poner huevos, lo que resulta en un aumento de la tasa de inoculación.

El aumento de las precipitaciones puede incrementar el número y la calidad de los criaderos de vectores. Así, después del huracán Mitch (1988) la incidencia de malaria, cólera, dengue y leptospirosis en centro América se incrementó de forma espectacular (*Epstein, 2005*). En 2000, la lluvia y tres ciclones inundaron Mozambique durante seis semanas, lo que dio lugar a multiplicar por cinco la incidencia de esta enfermedad (*Epstein, 2005*). En una escala menor de intensidad de estos efectos, los planes de irrigación incrementan la superficie acuática lo que también aumenta los criaderos de vectores. Las inundaciones, por el contrario, pueden eliminar hábitats de vectores y vertebrados en algunos casos. En general, las sequías disminuyen las zonas de abrigo y alimento pero en lugares húmedos pueden enlentecer los cursos de los ríos, creándose remansos que aumenten los sitios de cría y propicien una mayor deshidratación del vector, lo que les obliga a alimentarse más frecuentemente (aumenta el número de picaduras).

Además de estos factores, el incremento del comercio internacional aumenta la tasa de importación de vectores desde lugares remotos. Los movimientos de poblaciones, por turismo, trabajo o emigración, también favorecen la extensión de este tipo de enfermedades desde sus zonas endémicas.

Para sobrevivir al cambio climático los patógenos necesitan reservorios y vectores que sobrevivan en las condiciones climáticas nuevas. Probablemente se desplazarán hacia altas latitudes para encontrar temperaturas que les sean ecológicamente adecuadas. Si el patógeno y el reservorio tienen éxito en el clima cálido nuevo la enfermedad se puede extender rápidamente.

Existen numerosos vectores y enfermedades cuya transmisión está asociada a ellos. *Lopez Velez y Molina Moreno (2005)* proporcionan un buen resumen de las enfermedades principales y vectores de importancia en Europa y España ante el cambio climático. En la Tabla 2 se muestran sus resultados en los que se han introducido algunas modificaciones provenientes del presente trabajo. Los vectores principales son los mosquitos y las garrapatas. Sin embargo, los flebotomos (también llamados moscas de los arenales) y las pulgas también tienen son importantes en algunos casos.

Enfermedades transmitidas por mosquitos

Malaria

Causada por el protozoo *Plasmodium falciparum* (y otros plasmodios) y transmitida por mosquitos del género *Anopheles* (unas 400 especies del total de 3000 especies de mosquitos). 70 mosquitos anophe-

linos son capaces de transmitir la enfermedad, los más importantes son *Anopheles gambiae* y *Anopheles funestus*

La temperatura óptima para el desarrollo del mosquito es de 20-27°C y de 22-30°C para el parásito. No hay transmisión por encima de 3000 m de altura (pero empieza a ser más frecuente en zonas de alta montaña) ni a temperaturas mantenidas inferiores a los 15°C. Actualmente existen 273 millones de casos por año (1998) con un millón de muertos anuales. La población de riesgo a esta enfermedad es de 2400 millones.

Tabla 2. Enfermedades infecciosas y parasitarias cuya epidemiología puede verse afectada en España por el cambio climático (modificada a partir de Lopez Velez y Molina Moreno, 2005)

Enfermedad	Patógeno	Vector	Clínica
Malaria	<i>Plasmodium</i> sp	mosquito	fiebres palúdicas
Dengue	Flavivirus	mosquito	fiebre viral hemorrágica
Fiebre amarilla	Flavivirus	mosquito	Fiebre viral hemorrágica
Nilo Occidental	Flavivirus	mosquito	fiebre viral hemorrágica
Fiebre del valle del Rift	Phlebovirus	mosquito	fiebre viral hemorrágica
Tifus murino	<i>Rickettsia typhi</i>	pulga	fiebre tífica
Fiebre de Congo Crimea	Nairovirus	garrapata	Encefalitis
Fiebre botonosa	<i>Rickettsia conorii</i>	garrapata	fiebre maculada
Encefalitis por garrapata	Flavivirus	garrapata	Encefalitis
Enfermedad de Lyme	<i>Borrelia burgdorferi</i>	garrapata	artritis, meningitis, carditis
Fiebre recurrente endémica	<i>Borrelia hispanica</i>	garrapata	fiebre recurrente
Leishmaniosis	<i>Leishmania</i> sp	flebotomo	kala-azar

En el pasado se transmitía por toda Europa (Inglaterra, Escocia, Dinamarca, Noruega, Suecia, Finlandia y países Bálticos). En España se conocían las fiebres tercianas benignas (*P. vivax*), y en menor grado las tercianas malignas (*P. falciparum*) y las cuartanas (*P. malariae*). La transmisión dependía de lo cálido que fueran los veranos. El *P. vivax* y *P. malariae* se pueden transmitir a temperaturas más bajas que el *P. falciparum*. En el sur de Europa esta enfermedad fue muy prevalente hasta la instauración de un programa eficaz de control vectorial con el DDT. Se eliminó en la mayoría de estos países en 1961. En la actualidad, sólo se transmite el *P. vivax* de manera estacional y en focos muy concretos de Armenia, Azerbaiyán, Federación Rusa, Turkmenistán, Uzbekistán y en la zona asiática de Turquía. Hay preocupación por la alta densidad anofelina en Toscana y Calabria donde se han observado algunos casos de transmisión de *P. vivax*.

En España el *Anopheles atroparvus* está ampliamente distribuido pero es refractario a *P. falciparum*, lo que limita la transmisión autóctona de la forma más perniciosa de esta enfermedad.

Se ha documentado la relación entre incidencia de malaria y el fenómeno de el Niño en India, Colombia, Venezuela y Uganda (WHO, 2002). El estudio de las características climáticas de las zonas en donde está distribuido actualmente el *P. falciparum* ha permitido realizar una comparación con las zonas que tendrán dicho clima a partir del año 2050, de acuerdo con las predicciones del Hadley Centre for Climate Prediction and Research, desarrollada a partir del Panel Internacional sobre el Cambio Climático (Rogers y Randolph, 2000). En dicho estudio se predice que habrá una extensión de la enfermedad a algunas zonas situadas a latitudes norte y sur mayores que las actuales, incluyéndose algunas zonas de Marruecos y de Turquía, pero no se observa la posibilidad de que el *P. falciparum* llegue a los países que actualmente forman parte de la Unión Europea. Lamentablemente, la forma tropical de malaria está resurgiendo en África debido a estos factores climáticos (Hay et al., 2002). Se ha previsto que en este continente su incidencia aumente entre un 16-28% en personas-mes para el 2100 (Tanser et al., 2003).

Dengue

Se transmite por las picaduras del mosquito *Aedes aegypti* y en menor grado por *A. albopictus* (mosquito tigre) y *A. polynesiensis*. La incidencia de esta enfermedad se encuentra entre los paralelos 30°N y 20°S. Existen 4 serotipos del virus del dengue que producen desde infecciones asintomáticas hasta cuadros hemorrágicos potencialmente letales, estos últimos afectan a niños y adolescentes. Anualmente se producen en el mundo 250.000-500.000 casos de formas graves por año (dengue hemorrágico y dengue-shock). No existe una vacuna eficaz contra esta enfermedad. Como que el patógeno es un virus tiene una gran capacidad de transmisión, con epidemias explosivas en el ámbito urbano, donde puede afectar hasta el 70-80% de la población.

Desde los años 50 se ha producido un resurgimiento de esta enfermedad en el sureste de Asia y desde los años 70 en América, incluso a 1700 m de altura en México (Hopp and Foley, 2001; Patz et al., 2005). En los países europeos probablemente se eliminó la enfermedad debido al uso del DDT que extinguió los mosquitos del género *Aedes*, y fundamentalmente el *A. aegypti*. Sin embargo, existe preocupación por la aparición del mosquito tigre en Bélgica, Francia, Montenegro, Suiza, Hungría y España, que potencialmente puede transmitirla. Es una enfermedad con alto potencial de introducción en Europa, y España, ante el cambio climático por la reintroducción de los mosquitos antes mencionados y las costumbres urbanas de las zonas mediterráneas (ventanas abiertas, con gran actividad en las calles y parques).

Fiebre amarilla

Los mosquitos del género *Aedes* (fundamentalmente *A. aegypti*) también pueden transmitir la fiebre amarilla, cuyo agente patógeno es un virus. También la transmiten mosquitos de los géneros *Haemagogus* y *Sasbethes*. Se dispone de una vacuna eficaz para prevenirla. Es endémica de África y de la Amazonia. *A. aegypti* desapareció de las zonas continentales que rodean el Mediterráneo, muy probablemente por el uso del DDT, y desde entonces no existe riesgo.

Encefalitis virales

Existe un amplio grupo de enfermedades virales, encefalitis de San Luís, del Nilo occidental, y equinas del este, del oeste y venezolana que se transmiten por varios mosquitos, sobre todo del género *Culex* (*C. quinquefasciatus*, *C. pipiens*) y de garrapatas. En este caso, el reservorio principal lo constituyen las aves, aunque también pueden resultar infectadas muchas especies de mamíferos, anfibios y reptiles.

Producen un cuadro de meningitis o meningoencefalitis que puede dejar secuelas neurológicas permanentes. La transmisión de estas enfermedades no es posible a temperaturas inferiores a 20°C en verano. Las primaveras secas seguidas de veranos muy calurosos aceleran la transmisión de mosquito a ave. Los aumentos de temperatura pueden producir un aumento vectorial e incrementar el riesgo de transmisión.

Se han observado brotes de encefalitis de San Luis en California (1984) y de encefalitis equina venezolana en Venezuela y Colombia (1995). El virus del Nilo occidental es endémico en África pero hubo un brote muy importante en Nueva York en 1999, con diseminación explosiva posterior a 44 Estados y a 6 provincias canadienses en tan solo cinco años, transmitido por el mosquito *C. pipiens* a partir de aves migratorias infectadas (*Weiss et al.*, 2000). El verano del 2002 hubo otra epidemia de virus del Nilo occidental en los USA que infectó a 230 especies de animales (138 especies de pájaros) (*Epstein*, 2001).

La cuenca del Mediterráneo y el sur y este de la Península Ibérica acogen aves migratorias procedentes de África, por lo que son áreas de alto riesgo para la transmisión. En España, estudios de seroprevalencia entre los años 1960-1980 mostraron la presencia de anticuerpos en la sangre de los habitantes de Valencia, Galicia, Parque de Doñana y delta del Ebro lo que indicaba exposición al virus. Estudios de 80 líquidos cefalorraquídeos de pacientes con meningitis y más de 900 lotes de mosquitos realizados en el año 2000 no dieron ningún positivo que reflejase la presencia de esta enfermedad (*Lopez Velez y Molina Moreno*, 2005).

Enfermedades transmitidas por flebotomos (moscas de los arenales)

Leishmaniosis

Se transmite desde los perros a los humanos por dípteros del género *Phlebotomus* (*P. perniciosus* y *P. ariasi*; moscas de los arenales). Los agentes patógenos son protozoos del género *Leishmania* (*L. infantum* y *L. tropica*). La primera es endémica en España. Esta enfermedad reemergió en Europa en los años 60, una vez finalizados los programas de control que erradicaron del paludismo.

Los aumentos de la temperatura podrían acortar la maduración parasitaria dentro del vector (incrementándose el riesgo de transmisión), reducir el periodo de letargo invernal de los vectores y cambiar su distribución geográfica, desplazándose las especies más peligrosas hacia la zona norte de la Península Ibérica, que actualmente estén libres de la enfermedad. Es altamente probable que la distribución de la leishmaniosis en el continente europeo se amplíe hacia el norte, como consecuencia del calentamiento global del clima, a partir de los límites de distribución actuales. Existe también un alto riesgo de que la leishmaniosis causada por *L. tropica*, que en la actualidad solo se encuentra en el norte de África y Oriente Medio, pueda emerger en cualquier momento en el sur de Europa.

Enfermedades transmitidas por garrapatas

Comprenden muchas enfermedades de gravedad variada: borreliosis (fiebre recurrente endémica, enfermedad de Lyme), rickettsiosis (fiebre botonosa, fiebres maculadas), babesiosis, anaplasmosis, ehrlichiosis, tularemia, viriasis (encefalitis por picadura de garrapata o centroeuropea, enfermedad de Congo-Crimea, fiebre de Kyasanur...) (*Lopez Velez y Molina Moreno*, 2005). Las garrapatas más comunes en la Europa mediterránea son *Rhipicephalus sanguineus* e *Ixodes ricinus*. Una especie abundante en África es la *Hyalomma marginatum*. *R. sanguineus* es la garrapata común del perro y está implicada en la transmisión de la fiebre botonosa mediterránea. Su presencia no depende directamente del clima, sino de las

urbanizaciones y construcciones periurbanas-rurales que favorecen su desarrollo y colonización. *I. ricinus* está implicada en la transmisión de la enfermedad de Lyme.

La vida media de una garrapata puede exceder los 3 años, dependiendo de las condiciones climáticas. Las tres formas metamórficas del vector pueden estar infectadas, por lo que las garrapatas pueden transmitir la infección a sus crías por vía transovárica. Ello les da una mayor capacidad de difusión de las enfermedades. Además, estos arácnidos pueden sobrevivir a temperaturas de hasta -7°C, recuperando la actividad vital a los 4-5°C. Son muy sensibles a cambios de temperatura pequeños. Isotermas de 2°C condicionan la transmisión en África del sur y este. La disminución de la humedad reduce la viabilidad de los huevos. Un leve cambio climático podría aumentar su población, extender el período estacional de transmisión y desplazar la distribución hacia zonas más septentrionales.

Se han observado casos de importación de garrapatas y posibilidad de transmisión de enfermedades nuevas. La incidencia de encefalitis por garrapata en Suecia se ha incrementado sustancialmente desde mediados de 1980 (*Lindren and Gustafson, 2001*). *I. ricinus* se han extendido más al norte, debido al aumento de la temperatura. Desde los años 90 se han establecido garrapatas de la especie *R. sanguineus* en el sur de Suiza, habiéndose demostrado que están infectadas por rickettsias causantes de fiebre botanosa mediterránea y fiebre Q21.

La fiebre botanosa y la borreliosis de Lyme son endémicas en España. Es de temer que las garrapatas africanas del género *Hyalomma* puedan establecerse en España u otros países de la Europa del sur y dar lugar a la transmisión de la fiebre viral hemorrágica de Congo-Crimea.

Enfermedades transmitidas por pulgas

Los roedores pueden abrigar a vectores como garrapatas y pulgas (*Xenopsylla cheopis*, *Ctenocephalides felis* ...) que transmiten la peste y el tifus murino. Además, pueden ser huéspedes o reservorios de varias enfermedades como leptospirosis, fiebres virales hemorrágicas, hantaviriosis, himenolepiasis...

Las poblaciones de roedores silvestres y las posibilidades de contacto entre roedores y humanos en las zonas urbanas están muy influenciadas por los cambios ambientales. Periodos de sequía que podrían disminuir el número de predadores naturales de roedores y los periodos de lluvias subsiguientes podrían dar lugar a un aumento de la población de roedores.

En el sur de EE.UU. se desató una epidemia muy grave de hantaviriosis humana a principios de los años 90, asociada a un incremento inusual (de hasta 10 veces) de la población de roedores que actuaban de reservorio natural de hantavirus (*Peromyscus* sp). La causa se asoció con variaciones climáticas, en particular el Niño. En España se han detectado hantavirus en zorros y en roedores y en sueros de humanos.

Alergias

La incidencia de enfermedades alérgicas depende mucho de la duración e intensidad de la estación polínica, la frecuencia y amplitud de los episodios de polinización y de la carga de alérgeno.

La estación polínica en Europa se expande. En los últimos 30 años se ha incrementado en unos 10-11 días de media. El cambio climático influye en la cantidad, alergenidad y distribución de polen (*D'Amato et al., 2000*).

Conclusiones

La relación de la incidencia de diversas enfermedades, fundamentalmente de tipo infeccioso, con el clima es algo conocido desde los anales de la medicina. Sin embargo, lo expuesto en el presente trabajo muestra que se puede establecer una relación entre el aumento de la incidencia de diversas enfermedades y los cambios climáticos específicos observados en el siglo XXI, que a su vez dependen de la acción humana.

Así, el incremento de mortalidad en Europa asociado a la ola de calor del verano de 2003 es específica de un verano anómalamente caliente, demostrándose que se trata del más caliente de los últimos 500 años, por lo menos. Este es un caso claro, y grave, de impacto directo del cambio climático sobre la salud humana. Si bien no se ha vuelto a producir, es evidente que cualquier oscilación climática local sobre la tendencia de aumento de temperatura puede volver a dar muchos problemas en el futuro

Por otro lado, la extensión de los vectores de varias enfermedades infecciosas supone un riesgo claro de extensión más allá de las áreas en donde estas enfermedades se encontraban de forma endémica. De todos modos, independientemente de la gravedad de cada caso, es evidente que las enfermedades transmitidas por mosquitos tienen un potencial de incidencia mucho mayor que las transmitidas por garrapatas.

En el contexto de los países occidentales, en donde los sistemas sanitarios llevan muchos años de funcionamiento a un nivel aceptable, las enfermedades que son o serán causa de mayor mortalidad son aquellas relacionadas directamente con los efectos térmicos, fundamentalmente las olas de calor.

Otro aspecto importante que sobresale en el presente trabajo de revisión es el del incremento importante, previsto y observado, para una serie de enfermedades transmitidas por vectores en África y algunas zonas de Asia, como es el caso de la malaria. Paradójicamente, estas zonas son las que contribuyen menos al calentamiento global del planeta y por desgracia tienen que pagar un alto precio por él en términos de vidas humanas. Ello pone de manifiesto un factor añadido de desigualdad al comparar los desequilibrios entre el mundo desarrollado y subdesarrollado. Junto a las dificultades de acceso a recursos energéticos y de desarrollo económico, muchos de estos países tropicales tendrán que hacer frente a mayores problemas de mortalidad debidos a un cambio climático al que ellos habrán contribuido en una proporción muy pequeña. Este contraste plantea que es necesario establecer un mecanismo de compensación entre unos y otros, no sólo fundamentado en una justicia redistributiva sino para compensar por daños y perjuicios directos.

Referencias

Checkley, W., Epstein, L.D., Gilman, R.H., Figueroa, D., Cama, R.I., Patz, J.A. and Black, R.E. (2005) Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *Lancet* **355**, 442-450.

Colwell, R.R. (1996) Global Climate and Infectious Disease: The Cholera Paradigm. *Science* **274**, 2025-2031.

Constantin de Magny, G., Cazelles, B. and Guegan, J.-F. (2006) Cholera Threat to Humans in Ghana Is Influenced by Both Global and Regional Climatic Variability. *EcoHealth* doi: 10.1007/s10393-006-0061-5

D'Amato, G., Liccardi, G. and D'Amato, M. (2000) Environmental risk factors (outdoor air pollution and climatic changes) and increased trend of respiratory allergy. *J. Investig. Allergol. Clin. Immunol.* **10**, 123-128.

- Díaz Jiménez, J. (2005) Algunos aspectos de la influencia directa del cambio climático sobre la salud humana. In J.M. Baldasano (ed.). *Simposio Internacional sobre el Cambio Climático, desde la Ciencia a la Sociedad*. Presidencia de la Generalitat. Fundación Premios Rey Jaime I. Valencia. pp. 71-82.
- Epstein, P.R. (2001) West Nile virus and the climate. *J Urban Health: Bull. N Y Acad. Med.* **78**, 367-371.
- Epstein, P.R. (2005) Climate change and human health. *N. Eng. J. Med.* **353**, 1433-1436.
- Hay, S.I., Cox, J., Rogers, D.J., Randolph, S.E., Stern, D.I., Shanks, G.D., Myers, M.F. and Snow, R.W. (2002) Climate change and the resurgence of malaria in the east African highlands. *Nature* **415**, 905-909.
- Hopp, M.J. and Foley, J.A. (2001) Global-scale relationships between climate and the dengue fever vector, *Aedes aegypti*. *Clim. Change* **48**, 441-463.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M. and Wanner, H. (2004) European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* **303**, 1499-1503.
- Koelle, K., Rodo, X., Pascual, M., Yunus, Md. and Mostafa, G. (2005) Refractory periods and climate forcing in cholera dynamics. *Nature* **436**, 696-700
- Kosatsky, T. (2005) The 2003 European heat waves. *Euro Surveil* **10**, 148-149.
- Lindren, E. and Gustafson, R. (2001) Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. *Lancet* **358**, 16-18.
- López-Vélez, R. and Molina Moreno, R. (2005) Cambio climático en España y riesgo de enfermedades infecciosas y parasitarias transmitidas por artrópodos y roedores. *Rev. Esp. Salud Pub.* **79**, 177-190.
- Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. (1998) Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* **392**, 779-787.
- Mann, M.E., Amman, C., Bradley, R., Briffa, K., Jones, P., Osborn, T., Crowley, T., Hughes, M., Openheimer, M., Overpeck, J., Rutherford, S., Trenberth, K. and Wigley, T. (2003) On Past Temperatures and Anomalous Late-20th Century Warmth. *EOS* **84**, 256-258.
- Pascual, M., Rodo, X., Ellner, S.P., Colwell, R. and Bruma, M.J. (2000) Cholera dynamics and El Niño southern oscillation. *Science* **289**, 1766-1769.
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. and Foley, J.A. (2005) Impact of regional climate change on human health. *Nature* **438**, 310-317.
- Rahmstorf, S., Cazenave, A., Church, J.A., Hansen, J.E., Keeling, R.F., Parker, D.E. and Somerville, R.C.J. (2007) Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* **316**, 709.
- Rogers, D.J. and Randolph, S.E. (2000) The global spread of malaria in a future, warmer world. *Science* **289**, 1763-1766.
- Sunyer, J. and Grimalt, J.O. (2006) Global climate change, widening health inequalities, and epidemiology. *Int. J. Epidemiol.* **35**, 213-216.
- Tanser, F.C., Sharp, B. and Sauer, D. (2003) Potential effect of climate change on malaria transmission in Africa. *Lancet* **362**, 1792-1798.
- The World Health Organization (2002) *The World's Health Report 2002*. Geneva. WHO.
- Weiss, D., Carr, D., Kellachan, J., Tan, C., Phillips, M., Bresnitz, E. and Layton, M. (2000) Clinical Findings of West Nile Virus Infection in Hospitalized Patients, New York and New Jersey. *Emerg. Infect. Dis.* **7**, 654-658.

CAPÍTULO 5

EL FUTURO DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES

Mariano Marzo

*Departamento de Estratigrafía, Paleontología y Geociencias Marinas,
Universidad de Barcelona*

Introducción

La renovación de una sociedad resulta de una misteriosa conjunción de sueños, inspiración, creatividad y grandes dosis de realismo. O dicho de otra forma, la energía necesaria para el cambio proviene de una pócima que mezcla en la proporción adecuada ideas y hechos. Una de estas ideas, la de que nuestra sociedad debe reemplazar los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) por otras fuentes energéticas más limpias, goza de un gran predicamento entre la opinión pública. Sin embargo, hoy en día cerca del 83% de la energía primaria comercial consumida en el mundo procede de combustibles fósiles. Las energías renovables suministran el 5,5% del total y la nuclear el 11,5 %. Es obvio que durante un largo periodo de tiempo no podremos apañarnos sin petróleo, gas y carbón.

Pocos dudan ya del potencial de crecimiento de las energías renovables en los países industrializados. Sin embargo, se estima que hacia el 2030 los combustibles fósiles todavía representarán más del 80% de la energía primaria que el mundo consumirá. Esta cifra podría descender al 55% en el 2060, pero este porcentaje se refiere a un consumo total de energía que podría ser dos veces el actual. Si no se produce una espectacular revolución tecnológica que facilite y acelere la transición a una economía basada en el hidrógeno y/o la puesta a punto de tecnologías de fusión, la conclusión es clara: aunque en el futuro el porcentaje de consumo de los combustibles fósiles decrecerá en favor de las energías renovables, la cantidad total de carbón, petróleo y gas utilizada se incrementará respecto a los niveles actuales. Y no solo eso, sino que en las próximas décadas la resurrección e irresistible ascensión de la energía nuclear de fisión están cantadas.

En este contexto, este artículo se plantea como objetivo otear el horizonte del 2030 para tratar de encontrar, con las lógicas reservas inherentes a cualquier predicción, respuestas a una serie de preguntas de gran calado y que resultan inexcusables cuando se habla de sostenibilidad energética: ¿disponemos de suficientes reservas y recursos de petróleo, gas y carbón para hacer frente a la demanda futura?, ¿que

capacidad de producción hay poner a punto para colmar dicha demanda?, ¿qué implicaciones tendrá esto sobre el comercio mundial?, ¿qué grado de dependencia deberán soportar los países industrializados? y ¿cuál será el impacto ambiental sobre el planeta causado por el uso continuado y creciente de combustibles fósiles?

Para intentar responder a estas preguntas, existen diversos informes centrados sobre la previsión a largo plazo del crecimiento de la demanda y consumo de energía primaria. Entre estos destacan el *World Energy Outlook* (WEO) de la Agencia Internacional de la Energía (AIE)¹ y el *International Energy Outlook* de la *Energy Information Administration* del Departamento de Energía del Gobierno de los Estados Unidos. Por razones de espacio y simplicidad, este trabajo se estructura en torno a las conclusiones del escenario de referencia de la AIE publicadas en 2004² y posteriormente actualizadas en el 2005³.

El futuro de la demanda global de hidrocarburos

Las proyecciones del escenario de referencia de la AIE se basan en un conjunto de hipótesis sobre políticas gubernamentales, condiciones macroeconómicas, crecimiento demográfico, precios de los combustibles fósiles y desarrollo tecnológico. Tales proyecciones deben tomarse como una aproximación que solo resulta válida si los gobiernos no toman rumbos diferentes al marcado por los compromisos internacionales adquiridos en el momento de publicación de los informes citados en el párrafo precedente.

El crecimiento económico es probablemente el factor que más incide en la demanda energética. La AIE asume que durante el periodo de tiempo considerado (2003-2030) el Producto Interior Bruto mundial crecerá a un promedio del 3,2% anual, lo que constituye una cifra relativamente modesta en comparación con lo acontecido en las últimas décadas. Por lo que respecta al crecimiento demográfico, la AIE pronostica un aumento de la población mundial que va de los cerca de 6.200 millones de habitantes del 2003, a algo más de 8.000 millones en el 2030. Hipotéticamente, el precio promedio del barril de petróleo importado (expresado en dólares del 2004) se situaría en torno a los 35 dólares en el 2010, para luego incrementarse gradualmente hasta alcanzar los 39 dólares en el 2030⁴, mientras que el precio del gas natural también evolucionaría al alza, en paralelo al del petróleo.

Los cambios tecnológicos y de política de los gobiernos, constituyen, junto a las hipótesis formuladas sobre las condiciones macroeconómicas y los precios de los combustibles fósiles, los principales elementos de incertidumbre en el escenario de referencia de la AIE. Ambos factores, el tecnológico y el político, afectaran tanto a la demanda de servicios energéticos como a la tasa de inversión en infraes-

¹ La AIE, con sede en París, es un organismo autónomo, fundado en 1974, como consecuencia del shock petrolero de 1973, dentro del marco de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). Su objetivo es diseñar y llevar a la práctica un programa energético internacional. La AIE está integrada por los veintiséis países: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Corea del Sur, República Checa, Dinamarca, España, Estados Unidos de América, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza y Turquía. La Comisión Europea también participa en los trabajos de la AIE.

² INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *World Energy Outlook 2004*, OECD/IEA, París, 2004.

³ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *World Energy Outlook 2005, Middle East and North Africa Insights*, OECD/IEA, París, 2005.

⁴ A la luz de acontecimientos recientes, que han llevado el precio del barril a flirtar con los 80 dólares, podría pensarse que estas previsiones resultan obsoletas. Sin embargo, la AIE, en su *World Energy Outlook* del 2005, considera que la actual alza de los precios es coyuntural y que en los próximos años asistiremos a un descenso de los mismos. De todas formas, resulta significativo constatar que otro informe (*International Energy Outlook 2006*), publicado este mismo año por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, considera un escenario de referencia que estima para el 2030 un precio promedio del barril de importación en torno a los 57 dólares (expresados en términos del 2004) lo que supone un incremento del 46% respecto a la hipótesis de la AIE.

estructuras de suministro. Obviamente, estas incertidumbres se acentúan a medida que nos alejamos del presente, acercándonos al horizonte del 2030.

En relación al desarrollo tecnológico, la AIE piensa que durante el periodo considerado se producirán avances tecnológicos, pero que estos serán incrementales más que revolucionarios. Durante las próximas décadas algunas tecnologías hoy existentes se comercializarán a gran escala y se asistirá a una evolución gradual hacia el empleo de tecnologías menos contaminantes, particularmente de aquellas basadas en la utilización de energías renovables para la generación eléctrica. Pudiera ser que de aquí al 2030 se produjeran avances espectaculares en algunos campos, como en la comercialización del hidrógeno, pero predecir el momento en que esto ocurriría y su magnitud es imposible. Sin duda, los gobiernos pueden jugar un papel clave en el desarrollo de dichas tecnologías, propiciando e impulsando los programas de investigación y desarrollo en materia energética.

La AIE pronostica que durante el periodo 2003-2030 la demanda global de energía primaria se incrementará en un 52%, creciendo anualmente a un ritmo del 1,6%, hasta alcanzar la cifra de 16.271 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Conviene resaltar que la tasa de crecimiento citada es inferior al 2% anual de las tres últimas décadas y que el incremento previsto totalizará cerca de 5.538 millones de tep, que aproximadamente equivalen a la mitad de la demanda actual.

Más de dos tercios del aumento de la demanda mundial de energía primaria provendrá de los países en desarrollo, donde se concentrará el mayor crecimiento económico y demográfico. Los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) totalizarán casi el 25% y las economías en transición el 7%⁵. La porción de la demanda mundial correspondiente a la OCDE disminuirá desde el 51% actual, al 42% en el 2030, mientras que la de los países en desarrollo se incrementará del 39% al 49%. El porcentaje correspondiente a las economías en transición decrecerá ligeramente del 10% al 9%.

Los hidrocarburos (petróleo, gas y carbón) totalizarán cerca del 83% del incremento previsto hasta el 2030 en la demanda mundial de energía primaria y su porcentaje sobre el total aumentará ligeramente, de un 80% en el 2003, a un 81% en el 2030.

El petróleo seguirá siendo el hidrocarburo más utilizado, a pesar de que su porcentaje sobre el total de la demanda descenderá ligeramente, del 35% en el 2003, al 34% en el 2030. Se prevé que su demanda crezca anualmente un 1,4%, de los 79 millones de barriles diarios (Mbd) del 2003, a 92 Mbd en el 2010 y 115 Mbd en el 2030.

Del incremento de 36 Mbd previstos entre el 2003 y el 2030, las regiones en desarrollo contabilizarán algo más del 70%. El incremento de la demanda de petróleo de los países asiáticos totalizarán 26 Mbd, con China absorbiendo ella sola casi un tercio de esta cifra. El consumo de petróleo en América del Norte también crecerá con fuerza, de 24,1 Mbd en el 2003, hasta cerca de 30,6 Mbd en el 2030. La demanda en otros países de la OCDE se incrementará solo modestamente. América del Norte seguirá siendo, de lejos, el mayor mercado para el petróleo.

Dos terceras partes del incremento de la demanda mundial de petróleo provendrán del sector del transporte ya que no se prevé que ningún otro combustible alternativo pueda, de aquí al 2030, desafiar

⁵ La OCDE, fundada en 1960, está integrada por los veintiséis países que integran la AIE (ver nota a pie de página anterior) más Eslovaquia, Islandia, Méjico y Polonia. El término economías en transición engloba una serie de países que en el pasado integraban la URSS o se situaban bajo su órbita: Albania, Azerbaiyán, Bielorrusia, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Georgia, Kazajstán, Kirguizistán, Letonia, Lituania, Macedonia, Moldavia, Rumania, Rusia, Tayikistán, Turkmenistán, Ucrania, Uzbekistán y Yugoslavia. Por razones estadísticas, también se incluyen en este grupo a Armenia, Chipre, Gibraltar y Malta.

seriamente el uso de los derivados del petróleo. Se estima que en el 2030, el transporte absorberá el 54 % del consumo total de petróleo, frente al 47 % actual y el 33% en 1971. Esta fuente de energía primaria permanecerá como un combustible marginal en la generación eléctrica ya que el declive en su utilización en los países de la OCDE será superior al pequeño aumento que experimentará en los países en desarrollo. Previsiblemente, los sectores industrial, residencial y comercial tan solo incrementarán ligeramente su consumo de petróleo. La mayor parte de este tendrá lugar en los países en vías de desarrollo, en los que el gas natural todavía no será un serio competidor en los procesos industriales ni para el calentamiento del agua y de los hogares.

La demanda de gas crecerá más rápidamente que la de cualquier otro combustible, con la excepción de las fuentes energéticas renovables no hidráulicas. Con un crecimiento anual del 2,1%, en el 2030 el consumo de gas superará en más de un 70% el actual y hacia el 2015 habrá sustituido al carbón como segunda fuente de energía primaria mundial. Su porcentaje sobre el total de la energía primaria consumida en el mundo pasará de un 21% en el 2003, a un 24% en el 2030.

Este ascenso en la demanda de gas tendrá lugar en todas las regiones. En términos de volumen, el crecimiento estará encabezado por América del Norte, seguida por los países europeos de la OCDE. En términos de tasas de crecimiento, las mayores serán las de China y Sur de Asia, donde el actual consumo de gas es muy bajo.

En las próximas tres décadas, las nuevas plantas de generación de electricidad, especialmente las de ciclo combinado, representarán cerca del 60% del incremento en la demanda de gas. Esta forma de generación resulta más eficiente e implica menos costes de capital que las basadas en tecnologías nucleares o del carbón. Además, el gas presenta la ventaja sobre el carbón y el petróleo de un impacto ambiental más benigno por su menor contenido en carbono. Un porcentaje pequeño, pero creciente, de la demanda de gas provendrá de las plantas de transformación gas-líquidos y de las células de combustible para la extracción de hidrógeno.

La demanda de carbón aumentará a un ritmo de un 1,4% anual, aunque su porcentaje sobre el total de la energía primaria consumida en el mundo descenderá ligeramente, de un 24% en el 2003 a un 23% en el 2030. Dicha demanda se verá propiciada por el previsible descenso del precio del carbón en relación al gas y, a más largo plazo, por el desarrollo y despliegue gradual de tecnologías del carbón "limpias" y la manufactura de combustibles sintéticos (*coal to liquids*) como sustitutos de los derivados del petróleo. Sin embargo, en los países industrializados, la probable aplicación de regulaciones ambientales más duras y de nuevas medidas para combatir el cambio climático podrían desanimar las inversiones para la construcción de plantas energéticas alimentadas por carbón.

China e India, que disponen de grandes recursos a bajo precio, totalizarán casi las tres cuartas partes del alza de la demanda de carbón en los países en desarrollo y algo más de dos tercios del incremento a escala mundial. Para el 2030, China e India contabilizarán el 45% de la demanda global, frente al 35% del 2000. En estos dos países, el consumo de carbón seguirá ocupando el primer lugar entre todas las fuentes de energía primaria, aunque su porcentaje relativo disminuirá ligeramente.

En las economías en transición y en los países en desarrollo, los sectores industrial, residencial y comercial quemarán más carbón, pero la mayor parte del aumento de la demanda será para la generación eléctrica. De hecho, en el horizonte del 2030 y a escala global, el carbón seguirá siendo la principal fuente de generación eléctrica. En los países en desarrollo, la generación de electricidad basada en el carbón se habrá triplicado en el 2030, con la mayor parte de este incremento concentrado en China e India. En cam-

bio, en los países de la OCDE, dicha generación crecerá a un ritmo mucho más suave y su contribución al total de la producción de electricidad descenderá desde el 39% actual a un 31% en el 2030.

En los países en desarrollo y en las economías en transición, el consumo industrial de carbón (esencialmente utilizado en fundiciones de hierro y acero) evolucionará al alza, a un promedio anual del 1,2% y 1,3%, respectivamente. Por el contrario, en los países de la OCDE, la demanda de carbón para uso industrial experimentará un descenso del 0,4% anual. En estos mismos países, el consumo de carbón caerá mucho más abruptamente en el sector residencial y de servicios.

La disponibilidad de recursos y reservas de hidrocarburos

En párrafos precedentes hemos comentado el comportamiento de la demanda de petróleo, gas, carbón y energía nuclear prevista por la AIE en el horizonte del 2030. A la vista de dichas cifras, cabe preguntarse si el mundo dispone de suficientes recursos para afrontar tal demanda.

Las estimaciones sobre los recursos de petróleo recuperables del subsuelo del planeta difieren considerablemente entre sí, según que los cálculos incluyan, o no, los petróleos no convencionales (petróleos pesados o muy viscosos, arenas asfálticas y pizarras bituminosas), el petróleo que se encuentra en el subsuelo de áreas marinas ultra-profundas o en zonas árticas, los denominados condensados (hidrocarburos gaseosos en el subsuelo pero que a boca de pozo pueden recuperarse en forma líquida) y de que se maximice o minimice los efectos del previsible progreso tecnológico futuro en las actividades de exploración y extracción.

Simplificando la cuestión, puede afirmarse que las opiniones de los expertos varían entre dos polos extremos: la de los “pesimistas” y la de los “optimistas”⁶. Los primeros consideran que la posibilidad de ampliar el volumen de reservas conocidas mediante una mejor y más intensa explotación de los campos ya descubiertos es muy limitada y que los recursos globales por descubrir totalizan una cifra inferior a una cuarta parte de las reservas mundiales inventariadas. Los segundos, toman como ciertos los cálculos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)⁷, los cuales invocan al progreso tecnológico y el acceso a nuevas áreas, hasta ahora inaccesibles, para incrementar notablemente el volumen de las reservas extraíbles de yacimientos ya conocidos, así como para encontrar y desarrollar nuevos recursos.

La AIE se decanta por la posición más optimista, afirmando que los recursos y reservas mundiales de petróleo, aunque no se encuentran uniformemente distribuidos, son suficientes para cubrir la demanda prevista para el 2030⁸. Para el citado organismo, las incertidumbres radican más en los denominados “recursos de superficie” que en los del subsuelo, de forma que, como veremos más adelante, el principal escollo a superar es evitar que las tensiones geopolíticas, u otros factores económicos o políticos, retrasen las inversiones de capital y el despliegue científico-técnico requeridos para que la extracción mundial de crudo no se estanque o entre en declive con anterioridad a la fecha citada. De la magnitud del desafío planteado nos da una idea el hecho de que el monto global de las inversiones ha sido cifrado en unos 3 billones de dólares (del 2003) para la totalidad del periodo 2003-2030, lo que equivale a un promedio de 105.000 millones por año.

⁶ MARIANO MARZO, “El ocaso de la era del petróleo”, *Revista de Occidente*, 286, (2005), pp.86-103.

⁷ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, *World Petroleum Assessment 2000*, Washington. 2000.

⁸ Para un listado detallado de la distribución de reservas de petróleo por países y regiones, véase BRITISH PETROLEUM, *Quantifying energy, Statistical Review of World Energy June 2006*, London 2006, pp 6-7. (<http://www.bp.com>).

En este contexto, no cabe duda que los países de Oriente Medio y Norte de África juegan un papel clave en el futuro del mercado mundial del petróleo. La AIE, apoyándose en estimaciones del *Oil and Gas Journal* (2004)⁹, considera que el subsuelo de la región alberga el 61% de las reservas probadas de crudo que quedan en el planeta, totalizando 764.000 millones de barriles, de los cuales 262.000 millones corresponden a Arabia Saudita. Esta cifra dobla a la de Irán, país que ocupa el tercer lugar en el ranking mundial, tras Canadá, aupado al segundo lugar en base a la contabilización de sus recursos en petróleos no convencionales (arenas asfálticas). Tanto Irak como Kuwait, con unas reservas superiores a los 100.000 millones de barriles, ocupan los lugares cuarto y quinto, de forma que cuatro de los cinco primeros lugares del citado ranking está ocupado por países de Oriente Medio. Además de su potencial en reservas probadas, la AIE estima que la región de Oriente Medio y Norte de África también alberga el 35,5 % de los recursos mundiales de petróleo convencional todavía por descubrir, estimados en 883.000 millones de barriles por el USGS.

Merece la pena señalar que la AIE no oculta que las cifras de reservas probadas arriba apuntadas son las suministradas por los gobiernos y que existen dudas sobre la fiabilidad y exactitud de las mismas, ya que nunca han sido sometidas a auditorias o verificaciones por parte de organismos externos independientes. En concreto, existen serias sospechas sobre la fiabilidad de un brusco incremento de reservas anunciado hace unas décadas por los países de Oriente Medio. Dichas reservas pasaron de 400.000 millones de barriles a principios de los ochenta a 700.000 millones en 1989, alcanzando los 764.000 millones a finales del 2004. Durante la segunda mitad de la década de los ochenta, tanto Arabia Saudita como Kuwait incrementaron sus reservas en un 50% y algo similar hicieron la Unión de Emiratos Árabes e Irak. Como resultado, las reservas totales de Oriente Medio pasaron de 398.000 millones de barriles en 1985 a 663.000 millones en la década de los noventa, de forma que las reservas probadas mundiales experimentaron un brusco aumento de más del 40%. Es posible que la citada revisión al alza refleje estrategias gubernamentales para conseguir mayores cuotas de extracción en el seno de la OPEP y también, quizás, el cambio de propiedad de las reservas, que al pasar a manos estatales se libraron de la estricta normativa que la *US Securities and Exchange Commission* impone a las petroleras internacionales a la hora de contabilizar reservas. En cualquier caso, la opacidad que envuelve la cuestión de las reservas en los países de Oriente Medio es preocupante y resulta sorprendente constatar como durante la década de los noventa las reservas totales de muchos países permanecieron sin cambios. Por ejemplo, desde 1991 a 2002, las reservas oficiales de Kuwait se mantuvieron inalteradas en 96.500 millones de barriles a pesar de que durante el periodo considerado se habían extraído más 8.000 millones de barriles y no se habían realizado descubrimientos importantes. El caso de Arabia Saudita es aún más chocante: a pesar de la cantidad extraída y de la ausencia de grandes descubrimientos, en los últimos 15 años la cifra de reservas probadas tan solo ha sufrido una pequeña oscilación del 2%, entre 258.000 y 262.000 millones de barriles.

Por lo que se refiere al gas natural, la AIE también considera que los recursos mundiales son más que suficientes para cubrir la demanda global prevista en el horizonte del 2030, aunque para ello habrá que desarrollar un esfuerzo inversor de 2,7 billones de dólares (del 2003) durante la totalidad del periodo 2003-2030, lo que significa un promedio de 100.000 millones por año.

Una cuestión de gran relevancia geopolítica es que la Federación Rusa y Oriente Medio acaparan las dos terceras partes de las reservas globales de gas natural y que cerca del 40% de las mismas se concentran en tan solo dos países, Rusia e Irán¹⁰. Además, en las áreas geográficas citadas, gran parte de las

⁹ OIL & GAS JOURNAL, "Worldwide look at reserves and production", Oil and Gas Journal, 20-12-2004, pp 22-23.

¹⁰ Para un listado detallado de la distribución de reservas de gas natural por países y regiones, véase BRITISH PETROLEUM, Quantifying

reservas de gas se encontraron mientras se perforaba en busca de petróleo, por lo que es probable que en el futuro se realicen importantes descubrimientos.

Las reservas probadas de gas se han duplicado en los últimos veinte años, equiparándose a las de petróleo, en gran parte porque las de gas se han utilizado a un menor ritmo. Sin embargo, casi un tercio de las reservas mundiales de gas natural se encuentran “encalladas”. Es decir, sus costes de extracción y transporte a los mercados son demasiado altos para que resulte rentable su explotación. Este gas “encallado” se localiza en regiones muy alejadas de los mercados, albergado en el subsuelo de regiones marinas bajo una considerable lámina de agua, en lugares inaccesibles como el Ártico, o en campos muy pequeños, económicamente marginales. No cabe duda de que los avances tecnológicos y la disminución de costes experimentado en los últimos años en el campo del gas natural licuado supondrá un importante paso adelante para superar tales dificultades. Por otra parte, en las próximas tres décadas y muy especialmente en América del Norte, el suministro convencional de gas natural podría complementarse con el de gas no convencional. Este incluye: el metano asociado a yacimientos de carbón (*coal-bed methane* o CBM) y el gas extraíble de formaciones arcillosas (**gas shales**) o de areniscas de baja permeabilidad (*tight sands*).

Las reservas mundiales de carbón son enormes y, comparadas con las de petróleo y gas natural, presentan una distribución geográfica variada¹¹. Las reservas económicamente recuperables de carbón se sitúan en torno al billón de toneladas, lo que al ritmo actual de extracción aseguraría el suministro durante algo más de 200 años. Llama la atención el hecho de que cuatro grandes países como los Estados Unidos, Rusia, China e India, ocupan los puestos del uno al cuatro, respectivamente, en el ranking mundial de reservas, totalizando el 67,2 % de las mismas. Además, merece la pena resaltar que, a diferencia del petróleo y gas, algo menos de la mitad de las reservas globales están localizadas en países de la OCDE. En cualquier caso, debe remarcarse que en la práctica, como es el caso de España, la calidad y las características geológicas de los depósitos de carbón resultan más importantes para la economía de producción que el volumen de las reservas de un país.

La extracción y el comercio global de hidrocarburos

La AIE estima que la extracción de petróleo convencional aumentará de algo más de 75 millones de barriles diarios (Mbd) en el 2002 a cerca de 111Mbd en el 2030. Durante este periodo dicha extracción seguirá concentrada en un pequeño número de países¹². Los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), particularmente los de Oriente Medio, verán aumentar sus porcentajes de extracción, a medida que esta declinará en regiones ya maduras.

Las previsiones son que la extracción en los países que no son miembros de la OPEP alcance su cenit en el 2010, tras situarse un poco por debajo de los 48 Mbd y que a partir de ese momento se iniciará un lento declive. A medio plazo, fuera de la OPEP, los únicos países productores que experimentaran un auge significativo en la extracción de crudo son Rusia, Kazajstán, Azerbaiyán, Brasil y Angola. En el caso de Rusia, las previsiones de extracción son las de pasar de 7 a 8,6 millones de barriles diarios (Mbd) en el periodo 2001-2010, para continuar en ascenso hasta el 2030. Sin embargo, esto no será posible sin enormes

energy. Statistical Review of World Energy June 2006, London 2006, pp 22-23. (<http://www.bp.com>).

¹¹ Para un listado detallado de la distribución de reservas de carbón por países y regiones, véase BRITISH PETROLEUM, Quantifying energy. Statistical Review of World Energy June 2006, London 2006, pp 32-33. (<http://www.bp.com>).

¹² Para encontrar un listado detallado de la extracción y comercio internacional de crudo por países y regiones, véase BRITISH PETROLEUM, Quantifying energy. Statistical Review of World Energy June 2006, London 2006, pp 8-21. (<http://www.bp.com>).

inversiones en el desarrollo de los campos y en la construcción de oleoductos. Aumentar la extracción de la región del Caspio requerirá construir nuevos oleoductos para la exportación, lo que demanda acuerdos de financiación y de tránsito que todavía están por concretar. Suponiendo que tales líneas de exportación se construyan, la extracción combinada de Kazajstán y Azerbaiyán podría pasar de 1,1 Mbd en el 2001 a más de 3,5 Mbd en el 2010. Aumentar la extracción de crudo de los importantes campos marinos de Brasil y Angola implica el despliegue de tecnologías avanzadas para la extracción en aguas profundas y la existencia de un régimen estable de regulaciones e impuestos en ambos países.

Un reducido número de países de la OPEP que poseen vastas reservas y recursos deberán cubrir el déficit que existirá entre la extracción desde fuera de la OPEP y la demanda global. La lista incluye Arabia Saudita, Irán, Irak, Kuwait, la Unión de Emiratos Árabes, Nigeria y Venezuela. Estos países deberán incrementar su extracción de 28 Mbd en el 2002 a 33 Mbd en el 2010, para alcanzar los 65 Mbd en el 2030.

En gran medida, el desarrollo por parte de los países de la OPEP de la nueva capacidad de extracción requerida por el incremento de la demanda dependerá de que dichos países encuentren el capital necesario. A priori, esto no parece una tarea difícil, sobre todo si se comparan los actuales precios del barril de crudo con el hecho de que el coste total de desarrollar nuevos suministros en Oriente Medio es el más bajo del mundo, situándose en torno a los 4 dólares por barril. Sin embargo, a nadie se le escapa que las políticas de precios y de extracción de la OPEP son cuestiones muy inciertas, que los riesgos políticos para invertir en Oriente Medio son altos y que, además, no está claro que todos los países decidan abrirse a tiempo a la inversión financiera y tecnológica procedente del exterior. De estas incertidumbres nos ocuparemos con algo más de detalle en páginas posteriores.

Para el 2030, se espera que los petróleos no convencionales contribuyan con cerca del 8% al suministro mundial de petróleo. Esto representa una extracción de 10,1 millones de barriles diarios (Mbd), lo que significa un fuerte incremento respecto a los 1.6 Mbd del 2002.

La mayor parte de estos recursos no-convencionales provendrán de las arenas asfálticas de Canadá y de los crudos pesados de Venezuela. Se estima que ambas regiones contienen 580.000 millones de barriles de reservas recuperables, es decir, más que la totalidad de las reservas de crudo convencional de Oriente Medio. La proximidad de Canadá y Venezuela al mercado de los EE.UU. puede facilitar que estas fuentes energéticas lleguen a ser competitivas respecto a otras de menor coste de extracción pero provenientes de regiones más alejadas geográficamente. Por tanto, a medida que la extracción de los países de la OCDE entre en declive, la explotación de los recursos no convencionales constituye una oportunidad para reducir su dependencia de Oriente Medio, muy particularmente en el caso de los EE.UU.

En el periodo 2002-2030, la ampliación de la brecha entre extracción indígena y demanda acrecerá un considerable aumento del comercio internacional del petróleo. El comercio neto interregional evolucionará al alza, de los 32 millones de barriles por día (Mbd) del 2002, a los 65 Mbd del 2030. Todos los países y regiones que hoy en día son importadores netos, serán más dependientes al final del periodo considerado, tanto en términos absolutos como porcentuales.

En el caso de Asia, este incremento será particularmente dramático, especialmente en China, un importador neto desde 1993 y que en el 2030 necesitará importar cerca del 74% de su demanda, es decir, unos 10 Mbd, lo que equivale a un volumen similar a las actuales importaciones de los EE.UU.

La dependencia de las importaciones de los países europeos de la OCDE crecerá del 54% al 86%, mientras que la de los países del Pacífico encuadrados en la OCDE, llegará al 95%. El aumento de la ex-

tracción en Méjico y de petróleos no convencionales en Canadá, ayudaran a moderar el aumento de las importaciones en América del Norte, cuya dependencia del exterior pasará de un 36% al 55%. En conjunto, en el 2030, los países de la OCDE importarán el 85% de sus necesidades de petróleo, lo que contrasta con la cifra del 63% en el 2002.

Oriente Medio será la región que experimentará un mayor auge en el volumen de las exportaciones, pasando de 19 millones de barriles diarios (Mbd) en el 2000 a 46 Mbd en el 2030. El destino final del grueso de tales exportaciones será Asia, con China, seguida de la India, emergiendo como grandes mercados. Las exportaciones provenientes de África, América Latina y de los países con economías en transición (Rusia en especial), también crecerán, pero menos espectacularmente.

Por lo que respecta al gas natural¹³, las previsiones sobre las tendencias regionales en la extracción reflejan en gran medida la mayor o menor proximidad de las reservas a los mercados. En términos absolutos, la extracción experimentará un mayor crecimiento en las economías en transición y en Oriente Medio, regiones que destinaran la mayor parte de su incremento extractivo a la exportación hacia Europa y América del Norte. La extracción también aumentará rápidamente en África y América Latina.

La AIE cifra en 7,3 billones de metros cúbicos la nueva capacidad de extracción que será necesario poner a punto para cubrir la demanda global prevista para el periodo 2002-2030. Sin duda esto no podrá materializarse sin enormes esfuerzos inversores en instalaciones de extracción e infraestructuras de transporte. Además, en términos generales, a medida que las reservas localizadas cerca de los mercados vayan disminuyendo y las cadenas de aprovisionamiento tengan que alargarse, cabe esperar un incremento del porcentaje correspondiente al transporte en el monto total de los costes de suministro.

Para el 2030, el desajuste geográfico entre las regiones que contienen los recursos y las que concentran la demanda condicionará que los mercados del gas que hayan experimentado un mayor crecimiento sean mucho más dependientes de las importaciones. En términos absolutos, el mayor incremento de estas tendrá lugar en los países europeos de la OCDE.

La dependencia de estos países aumentará de un 36% en el 2002, a un 65% en el 2030. Oriente Medio se convertirá en un nuevo gran suministrador de gas al viejo continente, mientras que América Latina (Trinidad y Tobago, junto a Venezuela) verán incrementar notablemente sus exportaciones. Rusia, otros estados de la antigua URSS y los países del norte de África, seguirán ocupando los primeros lugares en el ranking de exportaciones a Europa.

Los países de la OCDE de América del Norte (Estados Unidos, Canadá y Méjico) que en la actualidad son, en mayor o menor grado, autosuficientes, verán como en el 2010 necesitarán importar cerca de un 4% de sus necesidades, porcentaje que se incrementará hasta el 18% en el 2030. Todas estas importaciones tendrán lugar como gas natural licuado (GNL) proveniente de América Latina, Oriente Medio y Asia.

China e India se convertirán, a corto plazo, en países importadores de gas natural. Este provendrá en su mayor parte de Oriente Medio y otros países asiáticos, aunque, a más largo plazo, Rusia también exportará gas a China y Corea.

Durante el periodo de tiempo considerado (2002-2030), los gaseoductos seguirán constituyendo las principales vías de transporte de gas en América del Norte, Europa y América Latina. En la actualidad

¹³ El lector interesado podrá encontrar un listado detallado de la extracción y comercio internacional de gas natural por países y regiones, en BRITISH PETROLEUM, Quantifying energy. Statistical Review of World Energy June 2006, London 2006, pp 24-31. (<http://www.bp.com>).

existen pocas conexiones físicas de los principales mercados de América del Norte, Europa y las regiones asiáticas del Pacífico con América Latina. Sin embargo, se espera que dichas conexiones se incrementen notablemente, mediante una rápida expansión del comercio de GNL y la construcción de nuevos gaseoductos submarinos y de larga distancia. Las proyecciones son que en el 2030, más del 50% del comercio interregional de gas natural se realice mediante el transporte marítimo de GNL, lo que significa un aumento del 30% respecto a los volúmenes actuales.

Como se ha indicado con anterioridad, a diferencia del petróleo y el gas natural, las grandes reservas mundiales de carbón presentan una distribución geográfica variada con la particularidad de que casi la mitad de las reservas globales están localizadas en países de la OCDE.

En el futuro, es probable que la minería del carbón se expanda de forma notable en China, los Estados Unidos, India, Australia, África del Sur, Indonesia, Canadá, Colombia y Venezuela, y que esta experimente un descenso en los países europeos de la OCDE¹⁴. Probablemente, Australia, Indonesia y China se ocuparan del abastecimiento de los mercados de la zona asiática del Pacífico, mientras que África del Sur, los Estados Unidos, Colombia y Venezuela hagan lo propio con los mercados europeos y atlánticos. La localización geográfica de África del Sur le permitirá abastecer a Europa, Asia y a ambas Américas.

Las previsiones apuntadas implican la necesidad de mantener una inversión constante en materia de infraestructuras, tanto de producción como de transporte. Esto resulta especialmente cierto para el caso de China y la India, donde el carbón está llamado a ser la locomotora de su futuro desarrollo económico. Estas inversiones se verán acompañadas por mejoras significativas en la productividad laboral, en la medida que el tamaño de las minas continúe aumentando y se adopten tecnologías avanzadas de extracción, preparación y transporte. Se espera que estos factores compensen el impacto negativo de los crecientes costes de producción y transporte.

Algunos países continúan subsidiando su industria del carbón, aunque tales prácticas han disminuido durante la última década. En el 2000, solo el 7% del carbón de la OCDE recibía todavía subsidios y estos también se han visto recientemente recortados en China. En su escenario de referencia, la AIE asume que en el transcurso de las tres próximas décadas los subsidios habrán dejado prácticamente de existir.

Los riesgos de interrupción temporal del suministro

Muy probablemente, la expansión del comercio global del petróleo y gas comentado en los apartados precedentes aumentará el riesgo de interrupciones temporales de suministro, no solo por la crónica inestabilidad política de algunos de los principales países exportadores, sino porque, para alcanzar los mercados, tanto el crudo como el gas natural licuado (GNL) deben atravesar algunos estrechos especialmente vulnerables a acontecimientos (accidentes, piratería, ataques terroristas o conflictos bélicos) que pueden acarrear su cierre o bloqueo temporal.

La historia de las últimas décadas es significativa al respecto. Desde 1970, el mundo ha experimentado diecisiete interrupciones de una magnitud igual o superior a los 0,5 millones de barriles diarios (Mbd). Todas ellas, salvo tres, estuvieron relacionadas con acontecimientos en países de Oriente Medio y Norte de África. Cinco de las principales crisis (la guerra árabe-israelí de 1973, la revolución iraní de 1978-1979, la guerra entre Irán e Irak de 1980-1988, la guerra del Golfo de 1990-1991 y la guerra de Irak en

¹⁴ Para un listado detallado de la producción de carbón por países y regiones, véase BRITISH PETROLEUM, *Quantifying energy*. Statistical Review of World Energy June 2006, London 2006, pp 34. (<http://www.bp.com>).

1993) provocaron cortes de suministro de entre 2,5 y 5,6 Mbd. Fuera de la región citada, las dos mayores interrupciones desde la década de los 90 fueron las originadas por la huelga en la compañía estatal de Venezuela (2,6 Mbd desde finales del 2002 a principios del 2003) y la causada por los huracanes en el Golfo de Méjico (1,5 Mbd en 2005).

Los puntos estratégicos de Oriente Medio y Norte de África a través de los cuales circula buena parte de las exportaciones de hidrocarburos son los estrechos de Ormuz y de Bab el-Mandeb, así como el Canal de Suez. En el 2004, los dos estrechos canalizaron 17,4 Mbd y 3,5 Mbd, respectivamente, lo que significó el 21% y 4% del suministro global de crudo. Por su parte el Canal de Suez hizo lo propio con 3,9 Mbd que representaron el 5% del suministro mundial. Para el 2030, las previsiones del escenario de referencia de la AIE son que las cifras citadas se incrementen a 32,5 Mbd en el estrecho de Ormuz, a 5.2 Mbd en Bab el-Mandeb y a 5,6 Mbd en el Canal de Suez. Estos datos, junto al hecho de que alrededor del 80% de las exportaciones totales de petróleo de Oriente Medio fueron embarcadas a través de al menos una de estas tres rutas marítimas, nos dan idea de la importancia de las mismas en el comercio global de crudo. Por lo que se refiere al GNL, en el 2004 las exportaciones por buques metaneros a través de las tres rutas citadas totalizaron 32.000 millones de metros cúbicos (Mmc) diarios en el 2004. Para el 2030 las previsiones son que dicho volumen se multiplique por siete, hasta alcanzar los 235.000 Mmc, lo que equivaldrá al 4% del suministro mundial.

Otros puntos de importancia estratégica para el comercio internacional de petróleo y GNL son los estrechos de Malaca y el Bósforo. En el 2003, ambos pasos canalizaron un flujo de 11 y 3 Mbd de crudo, respectivamente. La cifra apuntada para los estrechos de Malaca, un paso clave para el suministro desde Oriente Medio a Asia, representó el 14% de la demanda mundial de crudo. Sin embargo, se espera que este porcentaje aumente hasta el 20% en el 2030. El Bósforo constituye la puerta de acceso a una parte importante de los recursos del Mar Caspio.

Las consecuencias de un retraso de las inversiones en Oriente Medio

Las previsiones del escenario de referencia de la AIE señalan que para satisfacer la creciente demanda global, los países de Oriente Medio y Norte de África (OMNA) deberían ser capaces de incrementar la extracción de crudo de 29 millones de barriles diarios (Mbd) en 2004, a 50,5 Mbd en 2030, mientras que la de gas debería pasar de 0,385 a 1,211 billones de metros cúbicos en el periodo 2003-2004. La AIE estima que alcanzar estos volúmenes requerirá una inversión acumulada de 614.000 millones de dólares (a un ritmo promedio de 23.000 millones por año) para el petróleo y de 436.000 millones (16.000 millones por año) para el gas.

Sin embargo tales previsiones podrían no cumplirse por diversos motivos. Al margen de una hipotética escalada de la conflictividad e inestabilidad en los países de la región, que haría totalmente inviables alcanzar los objetivos arriba apuntados (el actual caso de Irak es significativo al respecto), los gobiernos pueden deliberadamente optar por expandir la capacidad extractiva a un ritmo más lento que el proyectado en el escenario de referencia de la AIE y también podría ocurrir que, independientemente de su voluntad, no pudieran disponer del capital necesario para acometer los proyectos previstos.

La situación de una ralentización deliberada de la capacidad extractiva podría producirse si los países de OMNA, especialmente los integrados en la OPEP, apostaran por mantener una relación entre oferta y demanda lo suficientemente ajustada para lograr precios altos en el mercado, incrementando así los beneficios netos derivados de sus exportaciones. Los riesgos asociados a esta opción son que otros

países actuaran en sentido contrario, aumentando rápidamente su capacidad de extracción, y, sobre todo, que los precios altos, además de hacer más competitivas las energías renovables, podría acarrear una caída de la demanda global que reduciría las exportaciones y los beneficios derivados de las mismas.

Asimismo, los gobiernos podrían decidir ralentizar la extracción para asegurar a las generaciones futuras los beneficios generados por la venta de los hidrocarburos. Sin embargo, esta opción solo parece plausible para unos pocos países de OMNA (como por ejemplo la Unión de Emiratos Árabes) con un Producto Interior Bruto per capita elevado y con poca presión para incrementar, en un contexto de crecimiento demográfico moderado, los beneficios necesarios para financiar programas sociales y de infraestructuras. Además, una decisión de este tipo podría aumentar los precios internacionales del crudo con los efectos negativos apuntados en el párrafo precedente.

La posibilidad de que los países de OMNA no consiguieran reunir a tiempo el capital necesario para hacer frente a las inversiones previstas podría darse por dos razones. En primer lugar, porque en los países en los que la industria del petróleo está en manos de compañías estatales, la financiación de nuevos proyectos puede resultar problemática en el caso de que deba recurrirse a préstamos externos y la deuda externa sea alta. En segundo lugar, porque la mayor o menor apertura del sector petrolero a la inversión extranjera, así como los regímenes fiscales y los términos legales y comerciales ofertados, pueden bloquear o retraer dicha inversión.

En muchos países de OMNA, los gastos en educación, sanidad, defensa y otros sectores de la economía —que incluyen los servicios públicos de electricidad y agua— pueden demandar un creciente porcentaje de los beneficios gubernamentales y, por tanto, limitar el flujo de capital hacia el sector del petróleo y el gas. A este respecto no puede olvidarse que las previsiones del escenario de referencia de la AIE para el periodo 2003-2030 contemplan un rápido aumento de la población en todos los países de la región, con una tasa de crecimiento anual promedio del 1,7%. Esto significa que incluso en los países abiertos al capital foráneo, las necesidades derivadas de la expansión demográfica pueden forzar a los gobiernos a aumentar las tasas y royalties sobre la extracción de hidrocarburos, lo que tendría un claro impacto sobre los márgenes de beneficio y las inversiones.

La AIE considera un escenario de inversiones aplazadas (*deferred investment scenario*) en el que explora las consecuencias que podrían derivarse de la concreción futura de algunas de las incertidumbres arriba apuntadas. Dicho escenario analiza como evolucionarían los mercados si las inversiones en exploración y extracción en cada país de OMNA permaneciera sin cambios durante el periodo 2004-2030, situándose al nivel promedio de la década 1995-2004 en términos de porcentaje del Producto Interior Bruto, lo que significaría un descenso del 23% respecto a las inversiones totales previstas en el escenario de referencia para el caso del petróleo y del 19% en el caso del gas.

Sobre la base de esta hipótesis de partida, el análisis de la AIE concluye algunos puntos que resultan de especial relevancia a la hora de evaluar la incidencia que los acontecimientos que se desarrollan en OMNA tienen sobre el futuro energético mundial. De entre dichos puntos destacan los siguientes.

Una reducción de las inversiones de la cuantía comentada con anterioridad, ocasionaría unas caídas cercanas al 30% y 38,5% en la extracción y exportación de crudo, respectivamente. Así, en el 2030, la extracción en el conjunto de OMNA alcanzaría los 35 millones de barriles diarios (Mbd) en comparación con los 50 Mbd contemplados en el escenario de referencia, mientras que las exportaciones disminuirían de 39 a 24 Mbd. Algo similar ocurriría con el gas natural, con una caída del 20% (238.000 millones de metros cúbicos) en la extracción y del 46,4% (206.000 millones de metros cúbicos) en las exportaciones.

En conjunto, para los países de OMNA esto significaría unas pérdidas de beneficios del orden de 1 billón de dólares (del 2004) para la totalidad del periodo 2004-2030.

Las caídas arriba apuntadas, difícilmente compensables desde fuera de OMNA, tendrían un serio impacto sobre los precios internacionales del petróleo importado y otros hidrocarburos (gas natural y carbón). En el escenario de inversiones aplazadas, los precios del crudo serían significativamente más altos (un 20% en promedio) que en el escenario de referencia, alcanzando en el 2030 una diferencia máxima de 13 dólares (del 2004) por barril, lo que implica un aumento del 32%. Este encarecimiento del precio de los hidrocarburos ocasionaría un descenso progresivo del Producto Interior Bruto global, de forma que la tasa media de crecimiento anual sería inferior en 0,23 puntos porcentuales a la contemplada en el escenario de referencia, lo que equivale a cerca de 3 billones de dólares (del 2004) por año.

Todas estas circunstancias alterarían de forma notable el balance energético mundial previsto en el horizonte del 2030. Respecto a las previsiones del escenario de referencia, el mundo tendría que reducir su consumo energético total en un 6%, poniendo especial énfasis en recortar su demanda de petróleo en un 9% y la de gas en un 8%.

Las emisiones de dióxido de carbono

Las proyecciones de aumento de la demanda mundial de hidrocarburos planteadas en el Escenario de Referencia de la Agencia Internacional de la Energía implicarían un aumento del 1,7% anual de las emisiones globales de dióxido de carbono a la atmósfera. Estas alcanzarían los 38.000 millones de toneladas en el 2030. Es decir, 15.000 millones más respecto a los niveles del 2002, lo que significa un aumento del 62%.

Durante el periodo 2002-2030, la estructura geográfica de las nuevas emisiones cambiará drásticamente. Históricamente, los países de la OCDE han sido los principales emisores de gases de efecto invernadero a la atmósfera, de forma que en el 2002 totalizaron un 54% del total de las emisiones mundiales. En dicha fecha, los países en desarrollo contribuyeron con un 36% y las economías en transición con el 10% restante. Por el contrario, en el 2030, los países en desarrollo totalizarán el 49% del total de las emisiones globales, lo que equivale a más de dos tercios del incremento previsto, mientras que los países de la OCDE y las economías en transición aportarán el 42% y el 9%, respectivamente. Entre el 2002 y el 2030, solo las emisiones de China aumentarán en 3.837 millones de toneladas, lo que significa más de un cuarto del incremento global.

Entre el 2002 y el 2030, la generación energética aportará casi la mitad de las emisiones globales de CO₂ (7.300 millones de toneladas). El transporte, con 3.800 millones, contribuirá con cerca de una cuarta parte y el resto se lo repartirán los sectores residencial, comercial e industrial.

El abrupto incremento de las emisiones de dióxido de carbono tiene especial relevancia sobre los compromisos adoptados por muchos países desarrollados en el marco del Protocolo de Kyoto. En particular, merece la pena destacar que en el 2010, el incremento de las emisiones de CO₂ previsto para los países europeos de la OCDE será un 9% superior a los objetivos fijados en el citado protocolo. Si se contabilizan todos los países de la OCDE comprometidos con el acuerdo, este porcentaje crece al 30%, lo que significa exceder los objetivos en 12.500 millones de toneladas. Este exceso deberá ser objeto de intercambio comercial con otros países cuyas emisiones no alcancen las cifras acordadas en el Protocolo. Por ejemplo, con las economías en transición que se sitúan un 25% por debajo de sus objetivos.

Conclusiones

Las proyecciones del escenario de referencia de la AIE para el periodo 2003-2030 dejan entrever unas tendencias de futuro que podríamos resumir en los siguientes puntos básicos:

- 1) La demanda mundial de energía primaria aumentará de forma inexorable de aquí al 2030, a un ritmo promedio del 1,6% anual. El incremento resultante será aproximadamente igual a la mitad de la demanda actual y se centrará, preferentemente, en los países en vías de desarrollo, con Asia y más particularmente China a la cabeza.
- 2) Los combustibles fósiles seguirán siendo la principal fuente de energía primaria, de manera que cubrirán más del 83% del incremento de la demanda global.
- 3) El aumento de la demanda mundial de petróleo pasará de 79 millones de barriles por día en el 2003 a 115 millones en el 2030. Dos terceras partes de este aumento serán absorbidas por el sector del transporte.
- 4) Entre todos los combustibles fósiles, la demanda mundial de gas natural será la que experimentará un mayor crecimiento, de forma que en el 2030 superará en más de un 70% el consumo del 2003. Las nuevas plantas de generación eléctrica, especialmente las de ciclo combinado, serán las responsables de cerca del 60% del citado aumento.
- 5) El consumo global de carbón también crecerá, aunque más lentamente que el de petróleo y gas. China e India, contabilizarán algo más de dos tercios del aumento de la demanda. La mayor parte de dicho incremento será destinado a la generación eléctrica, sector en el que el carbón seguirá siendo el combustible más utilizado.
- 6) Los recursos mundiales de petróleo, gas, carbón y uranio, parecen suficientes para cubrir el incremento previsto de la demanda. Sin embargo, en el caso del petróleo existen serias incertidumbres y una gran opacidad sobre la contabilidad de las reservas. Tanto en el caso de este hidrocarburo, como en el del gas natural, se necesitará un esfuerzo inversor sin precedentes para desarrollar nuevas reservas y se asistirá a un importante cambio en la procedencia de los suministros, que serán mayoritariamente cubiertos desde Oriente Medio y la antigua Unión Soviética. La mayor parte del incremento de la demanda de petróleo deberá ser garantizado por los países de la OPEP y, en menor medida, por la puesta a punto de nuevas tecnologías que permitan la explotación de los petróleos no convencionales de Canadá y Venezuela.
- 7) El comercio internacional de energía primaria, especialmente de los combustibles fósiles, está llamado a experimentar una gran expansión. Todos los países que en la actualidad son importadores netos de petróleo, muy particularmente los de Asia y los pertenecientes a la OCDE y a la Unión Europea, verán incrementar su dependencia de Oriente Medio. Del mismo modo, los mercados del gas que experimenten un mayor crecimiento, como por ejemplo Europa, también serán más dependientes de las importaciones. Los gaseoductos transnacionales se multiplicarán y el comercio de gas natural licuado experimentará un impresionante despegue.
- 8) La expansión prevista en el comercio global del petróleo y gas aumentará el riesgo de interrupciones temporales de suministro, tanto por la inestabilidad política de los principales países exportadores, como porque los hidrocarburos deben atravesar algunos puntos peligrosos, como los estrechos de Ormuz, Bab el-Mandeb y Malaca. En el caso del suministro de gas natural a la UE, resulta

vital acelerar los planes ya previstos para diversificar las fuentes de suministro y asegurar el procedente de Rusia.

- 9) La actual situación geopolítica en Oriente Medio resulta preocupante. Si no pudieran concretarse a tiempo las inversiones necesarias o estas se mantuvieran constantes durante el periodo 2004-2030, situándose al nivel promedio de la década 1995-2004, la extracción y exportación de petróleo y gas experimentarían caídas significativas, lo que podría modificar de forma notable el balance energético global.
- 10) Como consecuencia del mayor uso de los combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero y de CO₂ a la atmósfera experimentarán un aumento del 62% respecto a los niveles actuales. Dos tercios de este crecimiento tendrá lugar en los países en desarrollo y los países industrializados que hayan firmado el Protocolo de Kyoto afrontarán serias dificultades para cumplir sus compromisos.

CAPÍTULO 6

HIDROCARBUROS, PERSPECTIVAS DE FUTURO

D. Luis Javier Navarro Vigil

Consejero de BP España

Me referiré fundamentalmente al Petróleo y al Gas, por su asociación a lo largo de la correspondiente cadena de valor, desde su producción hasta su consumo. Así mismo, por la capacidad de sustitución del uno por el otro para determinados usos, en particular la generación de electricidad.

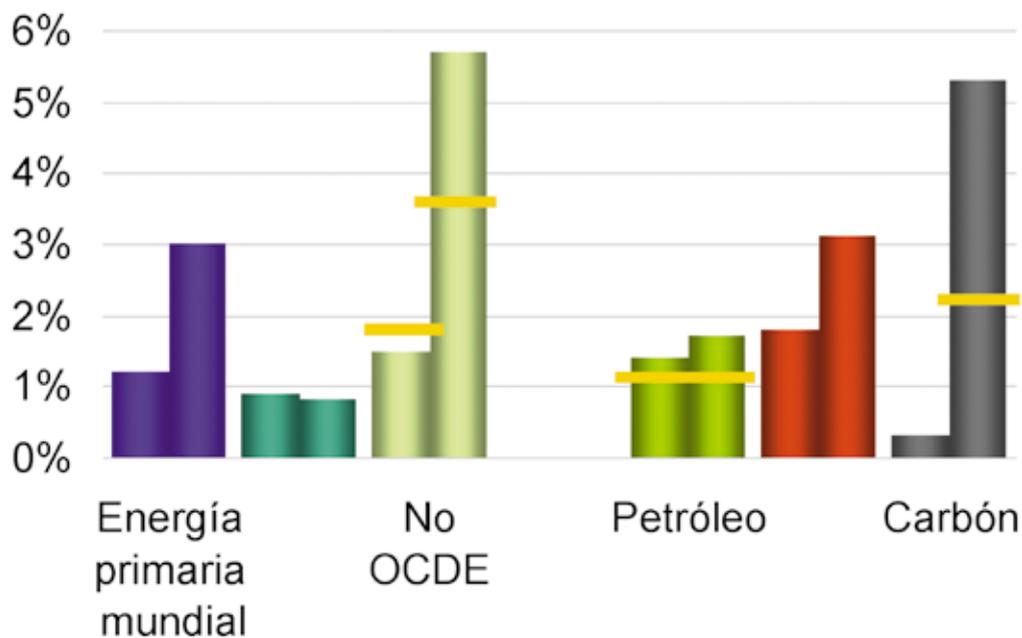


Fig. 1. Crecimiento de la demanda energética mundial. Las barras de la izquierda representan el período entre 1996 y 2001 y las de su derecha de 2001 a 2006. Las barras junto a la energía primaria mundial representan a los países de la OCDE. La línea amarilla horizontal limita la zona superior, correspondiente a China. Las barras rojas representan el consumo de gas. Fuente BP Statistical Review 2006.

Empezaremos por considerar el crecimiento de la demanda energética mundial (fig.1). Vemos que a lo largo del periodo 2001-2006 el consumo de todos los combustibles, salvo el de energía nuclear, registró una aceleración respecto a los cinco años previos. Concretamente, la tasa de crecimiento de la demanda mundial de energías primarias pasó del 1,2 % anual entre 1996 y 2001, al 3 % del período de 2001 a 2006. Pero, es relevante que mientras todo el crecimiento se produce en los países que no pertenecen a la OCDE (entre los que se encuentran la mayor parte de los países productores), en la OCDE (mayor parte de países consumidores) **el crecimiento del consumo energético se ralentizó**. También, observamos el gran impacto que tiene China en los datos mencionados: **casi la mitad del crecimiento energético mundial de los últimos cinco años procede de China**, con lo que el país domina claramente las cifras del conjunto mundial. No obstante, aun eliminando a China de la ecuación, el resto del mundo ha experimentado también una aceleración, en concreto del 1,2 % al 1,9 % anual.

En los últimos cinco años la energía ha hecho gala de unos precios excepcionales. El precio del petróleo ha subido todos los años, a pesar de que se esté ampliando su margen de capacidad productiva. En general, los precios del gas han ido pisando los talones a los del petróleo, especialmente en los mercados europeos y de la zona Asia Pacífico donde la indexación se hace respecto al petróleo. Sin embargo, los precios del gas en los mercados liberalizados y más competitivos de EE.UU. y el Reino Unido han experimentado etapas de retroceso debido a una disminución de la demanda y a la mayor disponibilidad de gas natural de importación. El carbón también se ha encarecido en todo el mundo, aunque en menor medida que el petróleo o el gas, y en los últimos años sus precios se han estabilizado.

Comparando los valores medios del último lustro con los del período previo (de 1996 a 2001), observamos que el precio del petróleo ha subido más del doble, los precios del gas se han incrementado en un 75 % y el promedio ponderado del precio del carbón refleja un alza del 46 %. Los precios a plazo indican que muchos operadores del mercado esperan que los precios de la energía se mantengan elevados como mínimo hasta el cierre de esta década.

Esto tiene una gran importancia por sus implicaciones geoestratégicas. Así, simplificando, diríamos que en el tema energético hay dos grandes preocupaciones en este mundo globalizado actual:

1. Seguridad de suministro
2. Impacto medioambiental

esta segunda incluye el Cambio Climático, pero no se limita a dicho fenómeno.

Existe un amplio consenso sobre que las emisiones de gases de efecto invernadero están contribuyendo al calentamiento global y al consiguiente cambio climático. El uso de hidrocarburos, para satisfacer la creciente demanda energética, es una fuente significativa de la parte de dichas emisiones provocadas por la actividad humana. Esto hace que el cambio climático se sitúe como tema prioritario en el debate sobre las opciones presentes y futuras del sector de la energía. Entre otras razones, porque se trata de un fenómeno cuyas potenciales consecuencias son graves, y porque requiere acciones urgentes. Pero, además, se trata de un caso singular, ya que "nadie está protegido de sus efectos, y es estrictamente necesaria la cooperación internacional para su solución".

Si consideramos ahora el crecimiento económico mundial (fig.2), vemos su gran paralelismo con el crecimiento de la demanda energética. Se saca una conclusión también muy importante: la intensidad energética del crecimiento económico es muy diferente entre los distintos bloques de países. En particular, en el caso de la OCDE se produce una disminución, lo que refleja los esfuerzos realizados en aumentar la eficiencia energética en los últimos años.

¿Cómo se explica pues el rápido incremento de los precios de la energía al tiempo que se aceleraba el crecimiento de la demanda energética?

La respuesta apunta en gran parte al **crecimiento económico**. A lo largo de los últimos cinco años, la economía mundial ha registrado un potente crecimiento. Si tomamos para el cálculo tipos de cambio que respetan la paridad del poder adquisitivo (PPA), el crecimiento económico alcanzó una media de 4,4 %, cifra que supera ampliamente el 3,5 % de media correspondiente al período de 1996 a 2001 y que convierte a los últimos cinco años en el período de crecimiento más dinámico desde la década de los 60.

Procedente principalmente de China, la aceleración del crecimiento fue ajena a la OCDE y se produjo a pesar del aumento continuado de los precios de la energía. En realidad, el crecimiento económico de la OCDE se quedó en un 2,5 % de media anual y los avances más tímidos se registraron tanto en EE.UU. como en la Unión Europea.

Pero además, la demanda de energía ha aumentado más rápidamente en relación al incremento del PIB durante el periodo de 2001 a 2006 que entre 1996 y 2001, lo cual sigue siendo cierto incluso cuando se omiten las cifras chinas. **El crecimiento económico en el conjunto de los países en desarrollo conllevó un uso más intensivo de la energía, y eso a pesar de sus elevados precios.**

Por lo tanto, es obvio que el crecimiento económico ha influido en la aceleración del crecimiento energético, aunque sólo en parte. El desarrollo económico sigue siendo el principal factor que impulsa el consumo energético. Sin embargo, es destacable que, en lugar de debilitarse, la relación entre crecimiento económico y demanda energética se haya intensificado. Entra en escena aquí el caso de China. Con todo, se constatan diferencias también en la intensidad del uso de energía destinado a la actividad y al crecimiento económico entre países pertenecientes y no pertenecientes a la OCDE. En este sentido, parece que el efecto disuasorio por el que un alza de los precios arrastra a la baja la demanda energética ha sido mayor en los mercados más ricos y abiertos de la OCDE.

Las consecuencias de la aceleración del crecimiento energético fuera de la OCDE.

La participación de cada combustible en la demanda mundial total de energía (fig.3) nos permite confirmar la consolidación de algunas tendencias. Así mismo, los cambios significativos que se producen en el petróleo (baja), y en el carbón (sube), a partir del año 2000. Este último causado fundamentalmente por el gran aumento de su demanda en China.

Repasando en primer lugar las variaciones que ha experimentado el peso relativo de cada combustible en la demanda total. Desde mediados de la década de los 80 hasta finales de los 90, la respuesta estaba clara. **El gas natural era el combustible de preferencia**, especialmente para generar electricidad. Su cuota de mercado aumentó, principalmente a expensas del carbón, mientras las cuotas del petróleo y de las energías nuclear e hidroeléctrica se mantenían relativamente estacionarias. Sin embargo, en los últimos años se constatan variaciones, en parte a causa de los cambios de precio y en parte a consecuencia del desarrollo chino.

A escala mundial, **el carbón ha recuperado cuota de mercado para convertirse en el combustible que registra el mayor crecimiento**. Han contribuido a ello el vertiginoso aumento del uso de carbón por parte de China y el hecho de que el resto del mundo abandonara su tendencia a evitar el carbón, en un momento en el que la variación de los precios relativos mejoraba las ventajas económicas de este combustible.

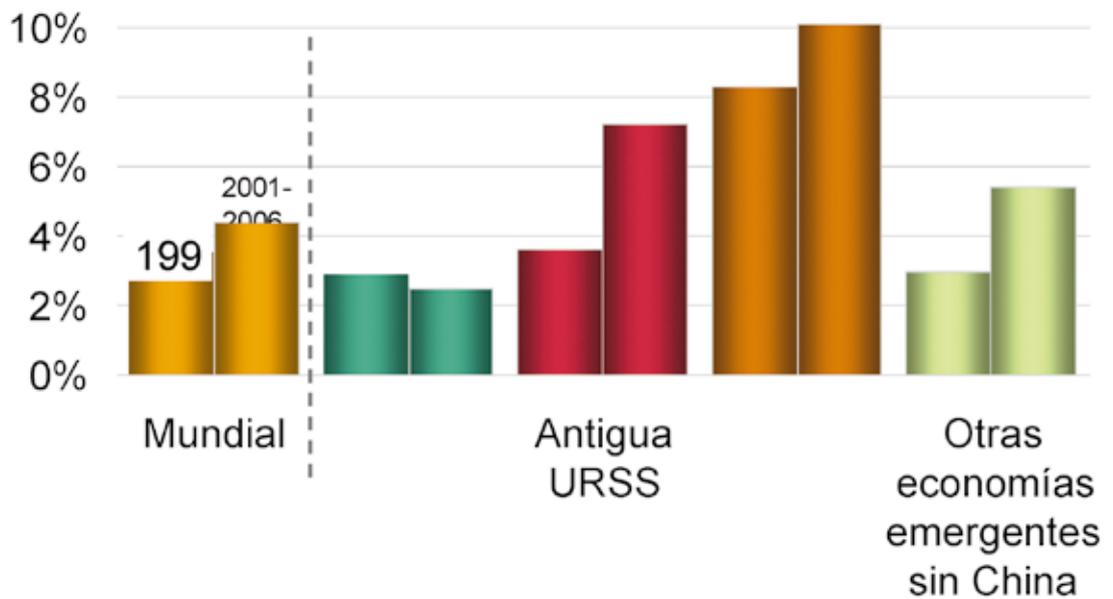


Fig. 2. Representación del Crecimiento económico mundial. Las barras de la izquierda de cada color representan el período 1996-2001, las de la derecha el 2001-2006. En verde oscuro países de la OCDE, en naranja China. Fuente BP Statistical Review 2006.

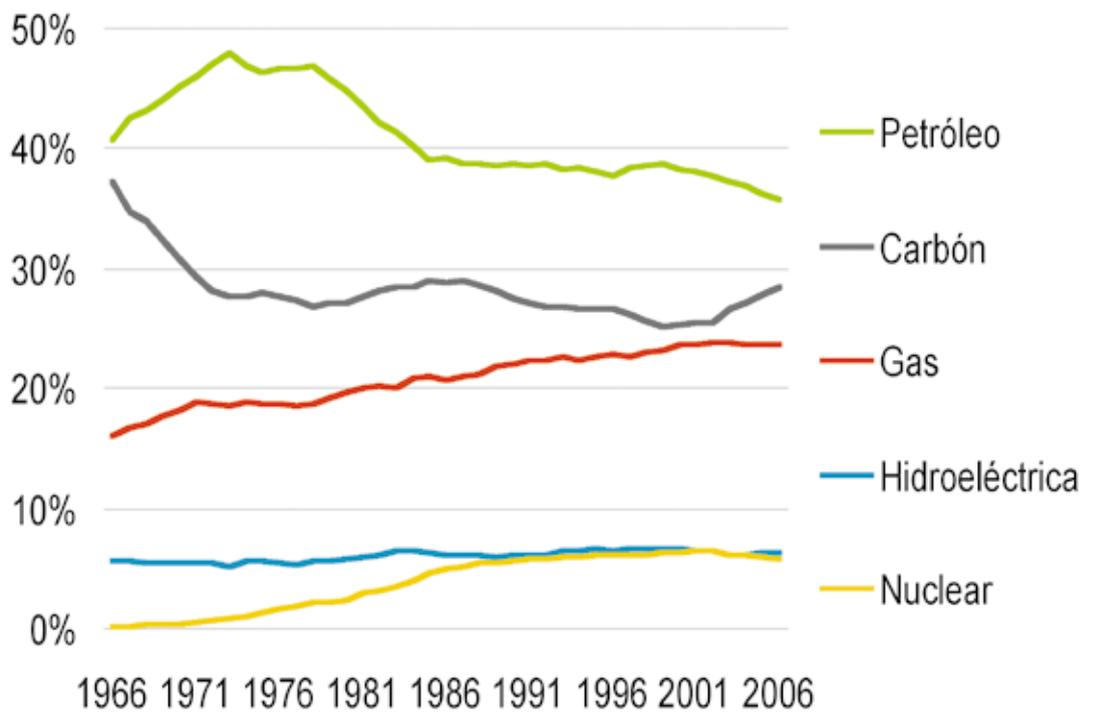


Fig. 3 Participación de cada combustible en la demanda total mundial de energía primaria en el período comprendido entre 1996 y 2006. Fuente BP Statistical Review 2006.

Fuera de China, la cuota de mercado del carbón se estabilizó. En cuanto al gas, su participación en el sector energético se ha estabilizado mundialmente. El gas sigue siendo el combustible que registra el mayor crecimiento en todo el mundo fuera de China. Sin embargo, el incremento del consumo de carbón en China ha sido tan contundente que ha conseguido eclipsar la fortaleza del gas.

Por su parte, el petróleo ha empezado a perder terreno a escala mundial.

Explican este retroceso, por una parte, el que los precios del petróleo fueran los que más se han encarecido y, por otra, la fortaleza de la demanda de electricidad y de otros sectores energéticos estáticos frente a la de energías que exigen ser transportadas. La demanda de electricidad ha crecido más rápidamente que la de energías primarias, y lo ha hecho en mayor medida fuera de la OCDE.

La evolución en EE.UU. ha sido distinta. Los elevados precios del gas natural han debilitado su demanda y han reducido su cuota de mercado. En realidad, el petróleo ha ampliado su cuota ligeramente porque la demanda energética del sector industrial se ha reducido, especialmente en el caso del gas natural.

Todo ello tiene repercusiones sobre las tendencias del CO₂. El incremento de la demanda energética ha sido robusto y el carbón ha ampliado su cuota de mercado. El aumento de las emisiones mundiales de CO₂ derivadas de la combustión de hidrocarburos se ha situado en un 3,4 % anual desde 2001, triplicando así la tasa correspondiente al período de cinco años previo. Norte América fue la única región o grupo de regiones donde el incremento de las emisiones se ralentizó.

Han sido también más intensivas las emisiones de CO₂ derivadas del consumo energético; es decir, las emisiones de CO₂ han aumentado más rápidamente que el consumo de energía. Tras describir una continua tendencia a la baja entre 1970 y 1996, la intensidad de las emisiones mundiales de CO₂ derivadas del uso de energía se estancó durante el período de 1996 a 2001, para repuntar a partir de

Índice: 1990 = 100

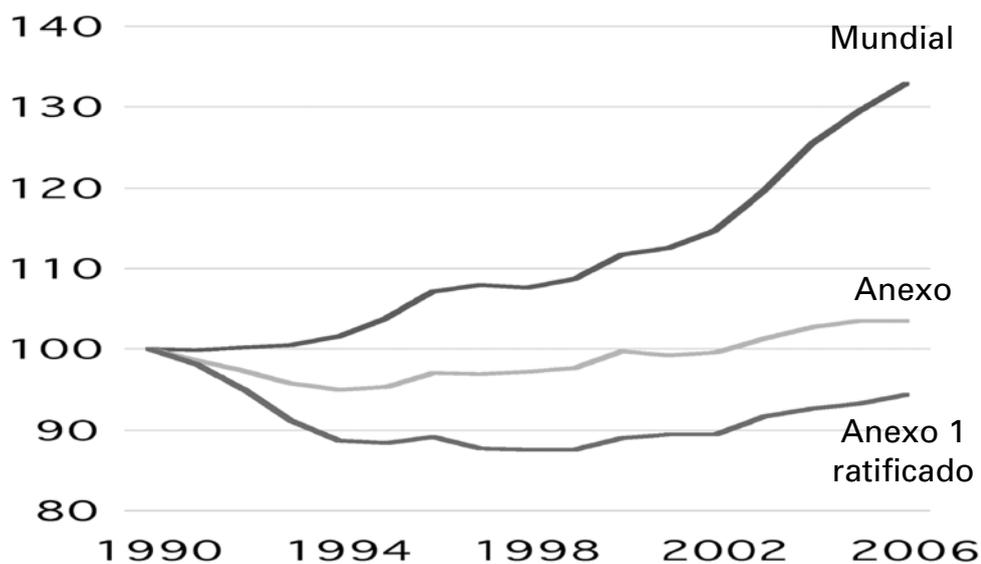


Fig. 4. Emisiones mundiales de CO₂ en el periodo 1990-2006. BP Statistical Review 2006.

entonces hasta la actualidad. El mundo sigue una obstinada tendencia a incrementar las concentraciones de CO₂ a pesar de que internacionalmente está cada vez más arraigada la idea de que es necesario tomar medidas.

Y todo esto, ¿dónde nos deja? A la hora de sacar conclusiones, conviene volver a la correlación fundamental entre PIB, consumo energético e incremento de las emisiones de CO₂.

Los últimos cinco años aproximadamente se han caracterizado por una aceleración del crecimiento económico fuera de la OCDE, a un ritmo casi equivalente al del crecimiento del consumo energético.

Como resultado, la diferencia entre el PIB y el consumo de energía se ha venido ampliando más paulatinamente que hace unos pocos años.

El motor que ha acelerado en todo el mundo el crecimiento de la demanda energética han sido los combustibles estáticos. En parte por una cuestión de precios, en parte por motivos de acceso y localización geográfica, y en parte por las exigencias que imponen la industrialización y el desarrollo económico, el carbón se ha convertido en el combustible de preferencia. A día de hoy sigue aumentando su peso relativo en la demanda mundial total de energías primarias.

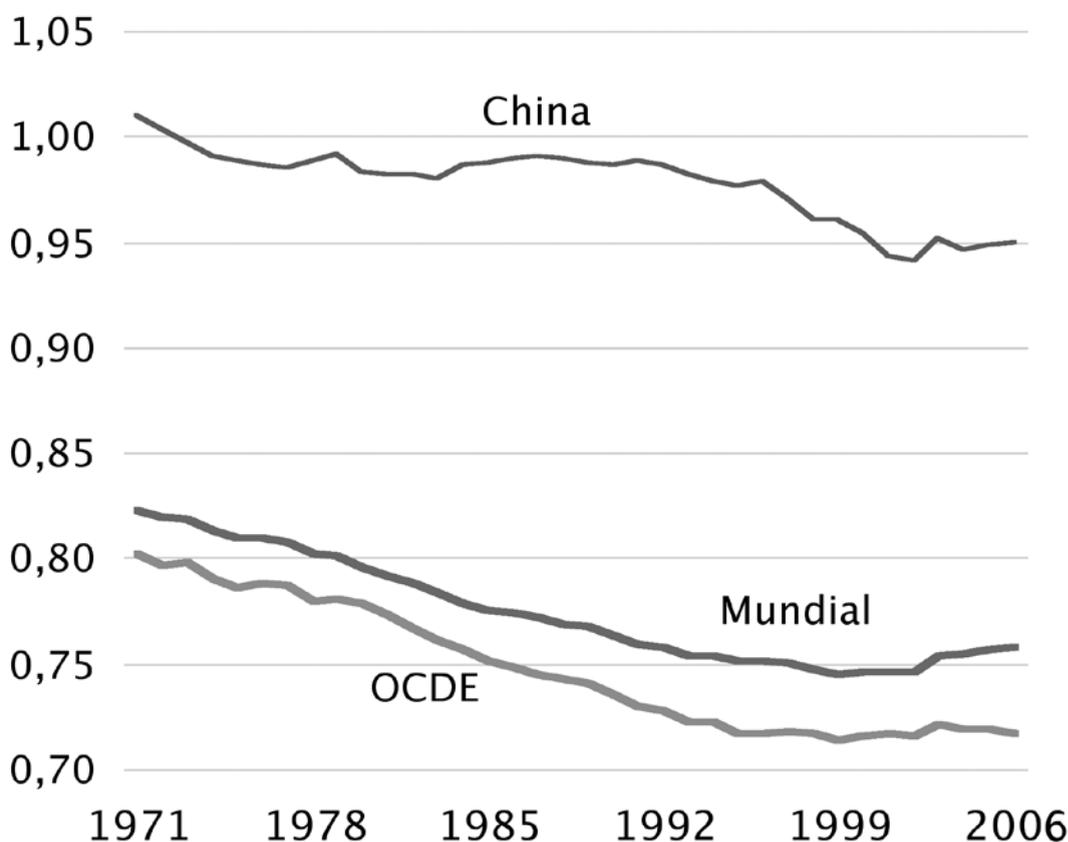


Fig. 5. Intensidad de las emisiones de CO₂. Las líneas representan las toneladas de CO₂ emitido por tonelada de energía primaria empleada. BP Statistical Review 2006.

Por ese motivo, la fina brecha que existía entre el crecimiento del consumo de energías primarias y el aumento de las emisiones de CO₂ se está estrechando. En lugar de reducirse, la intensidad de las emisiones de CO₂ ligadas al rápido incremento del PIB mundial ha aumentado en los últimos cinco años.

Centrándonos ahora en las emisiones de CO₂ por países (fig. 5), y, por tanto, en su potencial impacto sobre el cambio climático, se pone de manifiesto la enorme diferencia entre el crecimiento de dichas emisiones a nivel mundial (muy alto), y lo que ocurre en el bloque de países firmantes del Protocolo de Kyoto (moderado), y en el grupo de países que además han ratificado dicho Protocolo y han tomado medidas para limitar sus emisiones (¡una disminución!). Demostrando que los acuerdos internacionales son necesarios para progresar en la solución de este desafío.

Volviendo brevemente al punto 1., mencionado al principio, sobre la Seguridad de suministro, diríamos que hay una falsa percepción de que ésta se consigue con la autosuficiencia. En primer lugar, esto es prácticamente imposible para muchos países. Pero, además, las dos áreas de trabajo más prometedoras para contribuir a dicha seguridad son: la diversificación de las fuentes de suministro y el desarrollo de relaciones estratégicas (preferentemente multilaterales), que faciliten el comercio mundial de las diversas fuentes.

El debate sobre la duración de las reservas mundiales de petróleo y gas está de actualidad. Incluso, más recientemente, se pone énfasis en si, aun teniendo reservas, podremos aumentar su producción a la velocidad requerida por el aumento previsto de la demanda mundial. Es claro que no hay una única respuesta para este tema, pues se ve totalmente condicionada por los distintos escenarios propuestos para su cálculo. Pero, es también claro que el petróleo y el gas seguirán siendo necesarios para suministrar una parte importante de la demanda de energía en las próximas décadas. Permitiendo, así, una transición gradual y ordenada al modelo energético del futuro, en el que se reducirá drásticamente el contenido en carbono.

En dicho modelo, tendrán cabida muchas de las energías renovables que están ahora en estado de crecimiento, investigación y desarrollo. Pero, es importante saber que NO hay una solución única, ni una sola opción que lo resuelva todo. Hay que dejar progresar las distintas tecnologías, sin intentar un proceso de selección (es demasiado pronto para eso) de cuales deben ser las “ganadoras”.

Finalmente, se incluye un adjunto con una lista más detallada de Conclusiones y propuestas de acciones de futuro:

- El crecimiento económico fuera de la OCDE provoca un uso más intensivo de la energía y genera emisiones de CO₂ también más intensivas.
- Los combustibles fósiles son y seguirán siendo necesarios en el mix energético de los próximos 40 años.
- Es necesario:
 - Producir más y de forma más eficiente.
 - Usarlos de forma más eficiente.
 - Comenzar la transición a una economía baja en carbono.
- Dos tipos de acciones
 - Empresarial - Tecnológica
 - Política - Regulatoria

- Acciones Empresarial Tecnológica

- Desarrollo energía renovables

- Secuestro y captura de CO2

- Inversiones en eficiencia energética

- Acciones Política Regulatoria

- Crear un mercado eficiente de CO2, de tal forma que todas las emisiones de gases de efecto invernadero se incluyan como un coste en el precio de todas las cosas que compramos, desde un televisor a un viaje en tren.

- Subsidios para acelerar el desarrollo de tecnologías que disminuyan las emisiones.

- Cambio hábitos de consumo de la población.

CAPÍTULO 7

Energías alternativas, futuro de las diversas tecnologías

Félix Yndurain

*Departamento de Física de la Materia Condensada
Universidad Autónoma de Madrid*

El hombre, a lo largo de la historia, ha necesitado de energía para su desarrollo. Al principio de los tiempos la energía proporcionada por la biomasa era suficiente para las necesidades de calefacción, tratamiento de alimentos, iluminación etc. mientras que el transporte era suministrado por animales. La revolución industrial pudo llevarse a cabo gracias a la incorporación del carbón, de poder calorífico mayor que la biomasa, para mover máquinas y fundir y manejar metales y generar electricidad. De la misma manera en los años 50 del siglo del siglo XX, el petróleo fue el impulsor del transporte y de la sociedad moderna como la concebimos ahora. Finalmente, la energía nuclear, de mayor densidad energética que el carbón y el petróleo, contribuyó en los años 80, con una contribución importante, entre del 20% y el 80% según los países, a la producción de electricidad masiva en los países más desarrollados. La tecnología ha ayudado a mejorar los procesos de utilización de energía haciéndolos más seguros y eficientes. Las fuentes de energía y las tecnologías asociadas para su utilización son conocidas desde hace muchos años; el motor de vapor se conoce desde J. Watt (1769), la batería eléctrica desde A. Volta (1798), el generador eléctrico desde W. Siemens (1866), las plantas eléctricas de carbón desde H. Stinnes (1898), el motor de combustión interna desde C. Benz (1888) y H. Ford (1903), la lámpara eléctrica desde T. Edison (1879) etc. y, la energía eólica, la hidráulica etc. son también conocidos desde hace muchos años. La mejora de las tecnologías con el aumento de eficiencia, seguridad y coste ha marcado y va a marcar su penetración en el mercado. Sin embargo, a diferencia del pasado, el respeto al medio ambiente es un parámetro esencial en las fuentes energéticas del futuro.

La situación actual de suministro energético es razonablemente estable desde hace varias décadas, con fluctuaciones debidas esencialmente a las variaciones en el precio del petróleo y un aumento sostenido del consumo de energía primaria. En los próximos años se espera un aumento de consumo de energía a nivel mundial por dos razones principalmente; por un lado, aunque el consumo per capita en los

países industrializados está disminuyendo por el aumento de la eficiencia energética, en los países en desarrollo el consumo de energía per capita debe aumentar hasta alcanzar el de los países desarrollados. Por otra parte, el simple aumento de la población mundial lleva asociado un aumento del consumo energético. La población mundial actual es de 6000 millones de habitantes y se espera que aumente a 9000 millones a mediados de siglo, este aumento se debe principalmente a países en desarrollo como China, India y Brasil con un rápido crecimiento tanto en población como económico. Actualmente, los países industrializados, con un 25% de la población mundial, generan alrededor de 4/5 del producto interior bruto mundial y consumen del orden del 60% del total de energía primaria. En el otro lado, los países menos industrializados con un 75% de la población consumen el 40% de la energía primaria.

Probablemente la situación de las diferentes tecnologías energéticas no cambiará drásticamente en los próximos años, aunque hay dos factores muy importantes que van a condicionar el mercado energético de una manera importante y todavía incierta: por un lado el suministro de petróleo a los precios actuales no está garantizado en el futuro por la concentración de los yacimientos en unas regiones concretas del mundo y por señales de agotamiento de las reservas de crudo barato y, por otro lado, el hecho ya incuestionable de que las emisiones de gases y partículas por el uso de combustibles fósiles (del orden del 80% de la energía primaria consumida en el mundo) está afectando de forma cuantificable el clima y el medio ambiente. A esto hay que añadir que la mayoría de las centrales nucleares comerciales entraron en funcionamiento en los años 80, por lo que, dado que su vida útil es de unos 40 años deberán cerrarse en la década 2020-2030.

El presente documento se distribuye en los siguientes bloques: En una primera parte se discute el estado actual de la energía nuclear de fisión y el estado de las diversas tecnologías con proyección en el futuro. A continuación se discute la tecnología de fusión y los pasos necesarios para su implantación comercial. En el siguiente apartado se analiza la panorámica de las energías renovables con especial énfasis en la energía fotovoltaica. Se han escogido dos tecnologías de futuro que pueden mejorar sensiblemente la eficiencia energética como son los diodos de estado sólido para la iluminación y la superconductividad para el transporte eléctrico. Finalmente se analizan los costes actuales de las distintas tecnologías para la generación de electricidad.

Antes de analizar las distintas tecnologías vale la pena estudiar, aunque someramente, como el uso de las diversas fuentes afecta a las emisiones de CO_2 a la atmósfera. En este contexto hemos recogido en la tabla adjunta el porcentaje de consumo de energía primaria desglosado por las distintas fuentes y para distintos países.

Varios aspectos son destacables:

a) El enorme consumo (per capita) y las enormes emisiones de CO_2 a la atmósfera por parte de Estados Unidos, consumo que no se traduce en un aumento proporcional de PIB.

b) El enorme peso que tiene el consumo de carbón en India y China, este último con unas emisiones de CO_2 muy superiores a Brasil a pesar de que el consumo en este país es muy superior al de China. Este bajo índice de emisiones de CO_2 por parte de Brasil se debe al importante peso de las energías renovables (hidráulica y bioetanol) en las fuentes de energía utilizadas.

c) El caso de Francia, en cuanto a emisiones de CO_2 es notable si se le compara con países con Japón, Alemania y Reino Unido con consumos y PIB similares. Las emisiones de CO_2 por parte de Francia

son del orden del 60% de las de aquellos países. La razón hay que buscarla en la importancia de la energía nuclear en Francia.

d) Los datos de España se han incluido por completitud.

A continuación por su bajo impacto medioambiental y por la necesidad de disminuir su coste (ver más adelante), nos centraremos en las tecnologías nucleares y las energías renovables.

La situación de la energía nuclear de fisión está, en cierta medida, en una encrucijada: Los actuales reactores nucleares comerciales proporcionan una parte importante de la energía consumida en el mundo, del orden del 30 % de la electricidad en los países desarrollados. Las centrales nucleares son robustas y seguras y solo se pueden señalar dos accidentes importantes en los últimos años, aunque con muy distintas consecuencias para la población. La vida útil de 40 y hasta 60 años lleva al cierre de las centrales actuales en los años 2020-2030 sin que haya una propuesta concreta para el tipo de centrales nucleares del futuro (excepto por la iniciativa Generación IV). Sin embargo, el mayor problema de la energía nuclear de fisión reside en la radiactividad de los residuos generados. Aparte del almacenamiento geológico profundo del combustible gastado, única opción válida para el actual parque de centrales nucleares, se contemplan diversas opciones de futuro para el combustible quemado basadas en la transmutación y reciclado del combustible nuclear para producir energía a la vez que eliminar el Pu y los actínidos minoritarios. Estas opciones se dividen en reactores rápidos refrigerados por sodio líquido y reactores subcríticos apoyados por fuentes de espalación para producir neutrones. Ambas opciones están en fase de I+D aunque en diferente grado de desarrollo. Los sistemas asistidos por acelerador no estarán disponibles hasta muy entrado el siglo, mientras que los reactores rápidos están el umbral de su comercialización. El futuro programa debe cuidar además de la aceptabilidad pública de proponer procesos que eviten el riesgo de proliferación ya que en estas opciones el Pu juega un papel esencial. En este sentido, proponer para el reproceso un procedimiento apropiado y escalable a planta comercial es un objetivo prioritario de las actividades de I+D. De la misma manera el propio diseño del combustible es crucial y los datos neutrónicos y la neutróica misma del sistema son esenciales. La tecnología de reactores rápidos con reproceso (del orden del 30% del combustible nuclear se reprocesa actualmente) ha avanzado hasta el punto de que India está actualmente construyendo un reactor nuclear rápido para utilizar, además del uranio, el torio muy abundante especialmente en la India. Actualmente hay 31 reactores nucleares comerciales en construcción en el mundo (6 en la India, 4 en China, 2 en Bulgaria, 1 en Finlandia etc.). En relación con los aspectos económicos, a pesar de lo aventurado de unas conclusiones fiables, se ha estimado, una vez la planta en funcionamiento, un aumento del coste de la electricidad del orden del 10-20 % comparado con el coste de las actuales centrales de agua ligera.

A pesar de lo indicado anteriormente sobre ciclos cerrados del combustible y reproceso, un reciente estudio llevado a cabo por el MIT ("The Future of Nuclear Power". Massachusetts Institute of Technology. 2003) recomienda para Estados Unidos el ciclo abierto sin reproceso basándose en argumentos económicos y de riesgo de proliferación de plutonio. Aunque no considera la necesidad, en ese caso, de disponer de, al menos, un nuevo repositorio como el de Yucca Mountain cada 7-10 años. Por otra parte un estudio socioeconómico de la Universidad de Chicago analiza en que condiciones la energía nuclear sería competitiva económicamente con otras fuentes como el gas.

Es interesante ver el caso de Francia en relación con el futuro de su parque nuclear

- El 78% de la electricidad generada en Francia es de origen Nuclear
- Francia reprocesa del orden del 30% del combustible

- Framatome conjuntamente con Siemens en Alemania han desarrollado el European Pressurised Water Reactor (EPR)
- En mayo 2006 EdF aprobó la construcción de un nuevo 1650 MWe EPR en Flamanville, Normandía, además de dos unidades de 1300 Mwe
- Se espera el inicio de la construcción para diciembre 2007 y la entrega a EdF para mayo 2012. En enero de 2007 EdF encargó las partes principales del reactor a Areva y la turbina a Alston en 2006.
- Se espera que el coste de la electricidad generada sea de 4,6 c /kWh
- En agosto de 2005 EdF anunció el objetivo de reemplazar, a partir de 2020 y progresivamente, los actuales 58 reactores por reactores EPR a un ritmo de una unidad de 1600 MWe por año

Tabla 1. Consumo de energía primaria en algunos países en 2004

País	Carbón %	Nuclear %	Hidráulica %	Consumo per capita (tep)	Emisiones CO ₂ (ton per capita)	PIB(k\$) per capita
EEUU	24,98	7,92	2,65	8,07	19,8	44,4
China	67,87	0,83	5,43	0,78	3,2	2,02
India	53,66	1,19	4,52	0,31	1,2	0,81
Japón	22,23	10,34	4,52	3,99	9,7	34,4
Alemania	26,22	11,23	1,72	3,99	9,8	35,3
Francia	4,76	38,30	5,68	4,36	6,2	37,2
Reino Unido	17,52	9,01	0,58	3,69	9,4	39,5
Brasil	6,06	1,65	37,98*	1,03	1,6	5,68
España	14,80	11,60	6,01*	3,31	7,3	29,2

* Incluye otras renovables

Fuente: Varias fuentes (BP, IEA etc.) y elaboración propia

Obtener energía de la fusión de átomos ligeros como los isótopos de hidrógeno simulando las reacciones que tienen lugar en las estrellas es el gran reto de la energía de fusión. Aunque ya se ha de-

mostrado los conceptos básicos de la fusión, hay todavía un largo camino hasta la construcción de plantas comerciales. Ya se han obtenido pulsos de energía de fusión, pero una producción continua de energía está muy lejos. Ni siquiera el proyecto ITER prevé producción de energía. Sin embargo, el reto vale la pena ya que se la fusión proporcionaría energía limpia y en la práctica inagotable. Diversas tecnologías de confinamiento, interacción con la pared, diagnósticos, neutrónica, evacuación de calor etc. así como aspectos fundamentales de la física del plasma son aspectos de intensa actividad en el campo de investigación en fusión.

La I+D en fusión está bien coordinada a nivel internacional, en Europa a través de EURATOM y a nivel mundial, además de colaboraciones bilaterales, el proyecto ITER es una excelente plataforma de desarrollo y colaboración internacional. Los avances de las opciones tokamak y stellarator parecen bien compensados.

Retos e incertidumbres:

- I+D muy caro.
- Proyectos a muy largo plazo.
- La decisión, pensando en reactor de fusión, entre la opción tokamak y stellarator no será fácil. La desventaja del carácter pulsado del tokamak se compensa con la robustez del diseño frente a la complejidad de la configuración stellarator.
- La opción de confinamiento inercial siempre tiene el lastre de las aplicaciones militares y su aspecto reservado.
- La activación de materiales y la interacción plasma-pared son temas no resueltos.
- Los dispositivos de diagnósticos de los plasmas son una parte esencial en la operación de las instalaciones.
- La evacuación de energía en el caso del reactor y la producción de tritio a partir del manto de litio son temas a medio plazo de gran importancia e incertidumbre.
- Investigación básica en comportamiento de plasmas, la turbulencia, transporte de calor etc. son actividades a potenciar.

Las energías renovables tienen diversas características que las hacen muy atractivas, desde su bajo impacto medioambiental pasando por su carácter modular y distribución geográfica de los recursos. La mayor contribución proviene de la energía hidráulica que contribuye del orden del 10-15% a la producción eléctrica aunque su capacidad en el mundo desarrollado ha tocado techo (si exceptuamos Canadá). La biomasa tiene una contribución significativa (algo menos de un 10%) a la energía primaria. La energía eólica se ha desarrollado mucho en algunos países llegando a contribuir en unos pocos puntos a la producción de electricidad. Las energías renovables tienen dos grandes limitaciones: su capacidad limitada, casi todos los estudios de prospección indican una contribución que difícilmente llegará al 20% del total de la energía primaria y, por otra parte, el carácter intermitente dificulta su uso por lo que diversos sistemas de almacenamiento como baterías, volantes de inercia etc. se están desarrollando. Uno de los temas de investigación en energía eólica es la integración a la red cuando esta no es densa. La energía solar fotovoltaica, a pesar de ser todavía cara, tiene un futuro positivo, no tanto como generadora masiva de electricidad, sino como aplicación en lugares aislados en los que la red eléctrica no sea fácil y económicamente accesible. De entre las energías renovables es la fotovoltaica la más investigación necesita ya que las actuales célu-

las fotovoltaicas tienen un rendimiento muy bajo ya que solo aprovechan una longitud de onda del espectro solar. Hay diversas propuestas para mejorar este rendimiento. La más avanzada (ya se ha utilizado en el espacio) es la fabricación por epitaxia molecular de multicapas de distintos semiconductores para que cada uno de ellos absorba luz de distinta longitud de onda aumentando la eficiencia. Con esta técnica ayudada de la concentración solar se han obtenido células con un rendimiento del 40%. Actualmente se está investigando en los llamados puntos cuánticos en pozos cuánticos de manera que la brecha de energía del semiconductor tenga un "puente" en el nivel del punto cuántico. También se está trabajando en colorantes en las superficies de nanopartículas y en materiales orgánicos.

Desde el punto de vista del aumento de eficiencia hemos seleccionado dos tópicos: iluminación de estado sólido y superconductividad.

En un país como Estados Unidos se usa el 22% de la electricidad generada (un 8% del total de energía primaria) en iluminación lo que además representa un 7% del CO₂ emitido a la atmósfera. Las lámparas incandescentes tienen una eficiencia lumínica de sólo el 5% mientras que las lámparas fluorescentes su eficiencia es del orden del 20%. Recientemente se ha propuesto utilizar dispositivos de estado sólido basados en semiconductores para generar luz sin pasar por la incandescencia o plasmas. Actualmente se han fabricado dispositivos que han generado luz infrarroja con una eficiencia del orden del 75%, no hay ninguna razón física para que esto no se pueda hacer para luz visible. De hecho ya se han fabricado dispositivos de estado sólido que emiten luz blanca con una eficiencia del 35%, lejos del 50% proyectado para 2025 y a un coste excesivamente alto. Desde el punto de vista básico se controla bien el proceso de conversión de electrones (corriente eléctrica) en luz monocromática. De hecho ya funcionan muchos carteles luminosos basados en diodos de luz, sin embargo la combinación de diversos procesos para combinar luces de diversas longitudes de onda para producir luz blanca es un proceso abierto. La nanotecnología y los materiales orgánicos deberán jugar un papel importante en el desarrollo tecnológico necesario.

Otro aspecto de poca eficiencia es el transporte de electricidad en el que se pierde casi un 10%. Una posible solución para limitar estas pérdidas es utilizar materiales superconductores, materiales que, a muy bajas temperaturas, permiten circular la electricidad sin pérdidas. Estos materiales ya se utilizan para construir imanes con propiedades especiales como grandes gradientes de campo etc. del tipo usado en resonancia magnética en medicina. La utilización de estos materiales para el transporte y/o almacenamiento de energía en bobinas está muy lejos y necesitará importantes avances no solo tecnológicos sino científicos entre los que podemos indicar:

MATERIALES

- Investigación y descubrimiento de Nuevos Superconductores
- Control de la Estructura y Propiedades de Superconductores a Escala Atómica
- Maximizar la Capacidad de transporte de corriente de los Materiales Superconductores de y Técnicas de Fabricación Escalables
- Entender y Aprovechar diversas Fases Electrónicas

MECANISMOS

- Desarrollo de una Teoría completa y predictiva de los Superconductores y la Superconductividad
- Identificar las Interacciones Esenciales que dan lugar a la Superconductividad de Alta Temperatura crítica

- Avanzar en la Ciencia de los Vórtices

Finalmente, en la tabla adjunta se incluyen los costes de generación electricidad según estudios de dos fuentes distintas.

Tabla 2. Coste de producción de electricidad por kWh generado

Fuente de Energía	Coste c\$/kWh	Coste c/kWh
Nuclear	5,0	4-6
Carbón	4,0	3-5
Ciclo Combinado de gas	3,8	2-4
Solar Fotovoltaica	22,3	20-80
Solar termoeléctrica	17,3	12-18
Eólica	6,6	2-5

Fuente: DOE e International Association for Energy Economics. NewsLetter 2003

Fuente: Imperial College Centre for Energy Policy and Technology (ICCEPT)

Bibliografía

Yndurain, F. "Energía: Presente y Futuro de las Diversas Tecnologías" Academia Europea de Ciencias y Artes. 2005.

"Report on research and development of energy technologies". Edited by IUPAP working group on energy. October 2004.

"The Future of Nuclear Power". An interdisciplinary MIT study. Copyright © 2003 Massachusetts Institute of Technology. ISBN 0-615-12420-8

"The Technology of the Integral Fast Reactor and its Associated Fuel Cycle", Progress in Nucl. Energy 31, 1997.

"A European Roadmap for Developing ADS for Nuclear Waste Incineration" The European Technical Working Group on ADS - April 2001.

"Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles A Comparative Study". NUCLEAR ENERGY AGENCY. ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. 2002

Darwin & Charpak en "Megawatts and Megatons". Ed. A.A. Knopf, New York. 2001

"A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems". U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. Dec. 2002

Report to Congress on Advanced Fuel Cycle Initiative: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research. U.S. Department of Energy. Office of Nuclear Energy, Science, and Technology. January 2003

"ITER Physics Basis". Editors: F. W. Perkins (ITER JCT), D.E. Post (ITER JCT), N.A. Uckan (ORNL), M. Azumi (JAERI), D.J. Campbell (NET), N. Ivanov (RRC- Kurchatov), N.R. Sautho (PPPL), M. Wakatani (Kyoto Univ.). Additional contributing editors: W.M. Nevins (LLNL), M. Shimada (JAERI), J. Van Dam (Univ. Texas). Nuclear Fusion, Vol. 39, No. 12 c, 2137, 1999.

Andreani R. and Gasparotto M., "Overview of fusion nuclear technology in Europe", Fusion Engineering and Design, 61-62, 27, 2002.

Wesson W. "The Science of JET. The achievements of the scientists and engineers who worked on the Joint European Torus" 1973-1999. Preprint of a Paper to be submitted for publication in Nuclear Fusion. March 2000.

Grätzel M., "Photoelectrochemical cells", Nature 414, 338, 2001.

Larbaleister D., Gurevich A., Feldmann D. M. & Polyanskii A., "High-Tc superconducting materials for electronic power applications", Nature 414, 368, 2001.

"Basic Research Needs for Solid-State Lighting", Report of the Basic Energy Sciences. DOE, May 2006.

CAPÍTULO 8

Energía solar térmica

Antonio Colmenar Santos
Profesor Titular de la UNED

Energía solar térmica

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía del sol para producir calor. Su principal componente es el captador, por el cual circula un fluido, generalmente agua, que absorbe la energía radiada del sol. De acuerdo a la temperatura de aprovechamiento se puede clasificar en sistemas de baja, media y alta temperatura, figura 1.

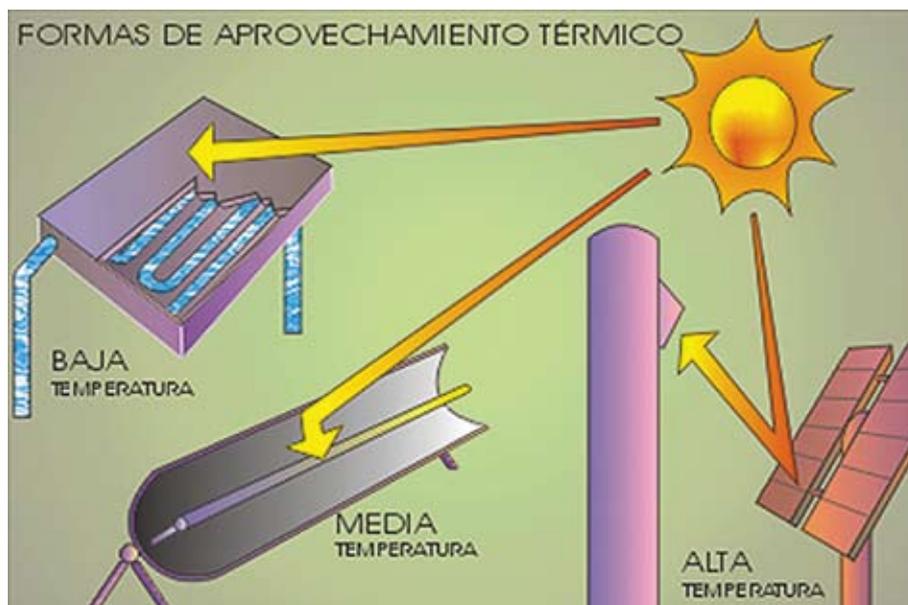


Figura 1. Clasificación de un sistema solar según su nivel de temperatura.

Energía solar térmica de baja temperatura

La tecnología de baja temperatura va destinada al calentamiento de agua por debajo de su punto de ebullición ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), que puede aprovecharse para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, ya sea agua caliente sanitaria (ACS), calefacción o para piscinas. El sistema que más se utiliza es el colector plano, seguido por el de tubos de vacío, figura 2.

El sol calienta el colector solar, que transmite la energía a un fluido que es aprovechado directamente o que es almacenado en un depósito para su aprovechamiento posterior.



Figura 2. Colectores planos y colector de tubos de vacío.

Energía solar térmica de media temperatura

La tecnología de media temperatura va destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este tipo de sistemas se puede utilizar para la producción de vapor o para el calentamiento de otro tipo de fluido. Los colectores más utilizados son los cilindro-parabólicos, figura 3.



Figura 3. Colector cilindro - parabólico

Energía solar térmica de alta temperatura

Generan temperaturas mayores a 400 °C. La energía se usa para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica. Las centrales se instalan en regiones donde la posibilidad de días nublados es remota. El procedimiento empleado, dada la baja densidad energética de la radiación solar, consiste en concentrar la radiación utilizando algún tipo de sistema óptico basado en lentes o espejos, como colectores parabólicos, de disco o centrales de torre con helióstatos, figuras 3, 4 y 5.

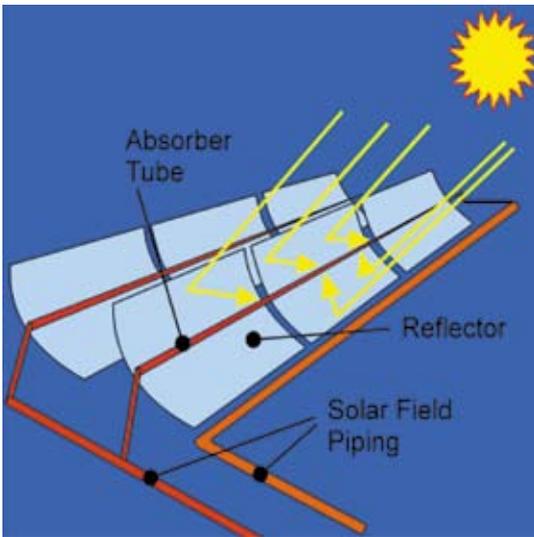


Figura 3. Colector cilíndrico-parabólico.

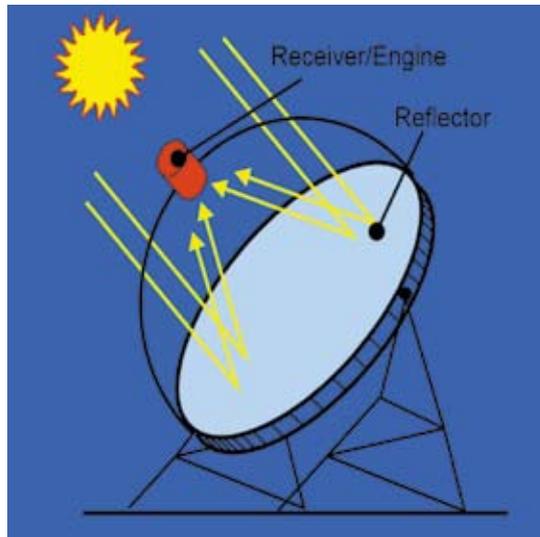


Figura 4. Colector disco-parabólico.

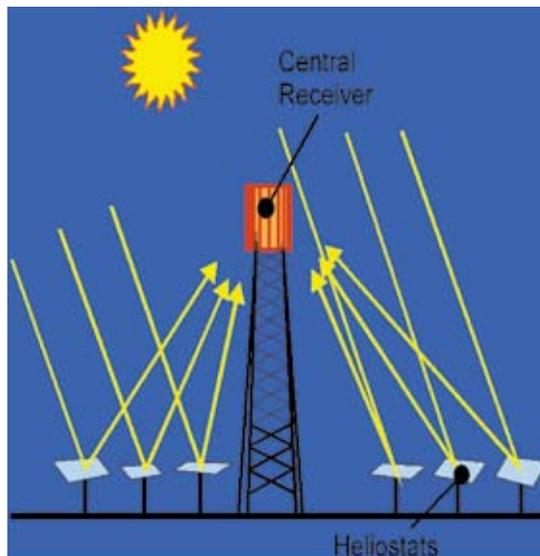


Figura 5. Central de torre con helióstatos.

Aplicaciones de los sistemas solares térmicos de baja temperatura

A continuación se van a explicar algunas de las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura.

Agua caliente sanitaria

Uno de los usos principales de la energía solar térmica de baja temperatura es el calentamiento de agua para consumos domésticos e industriales. Es lo que se denomina agua caliente sanitaria (ACS) por su vinculación con la higiene y la salubridad.

El principio de funcionamiento se basa en la captación de la energía solar mediante un conjunto de colectores y su transferencia a un sistema de almacenamiento, que abastece el consumo cuando sea necesario. En el interior del colector, con el que se capta la radiación solar, existe un serpentín, por el que circula agua que es empujada por la gravedad o por una bomba. El fluido calentado es o bien enviado a un depósito muy bien aislado para su uso en el momento requerido o bien es utilizado para calentar el ACS utilizando un intercambiador de calor.

Teniendo en cuenta la utilización del agua calentada en el colector, las instalaciones solares térmicas para agua caliente sanitaria pueden clasificarse en dos grandes grupos:

Instalaciones de circuito abierto (de distribución directa)

En ellas el agua que circula por el colector solar es utilizada directamente para el consumo. Un esquema de estas instalaciones puede observarse en la figura 6.

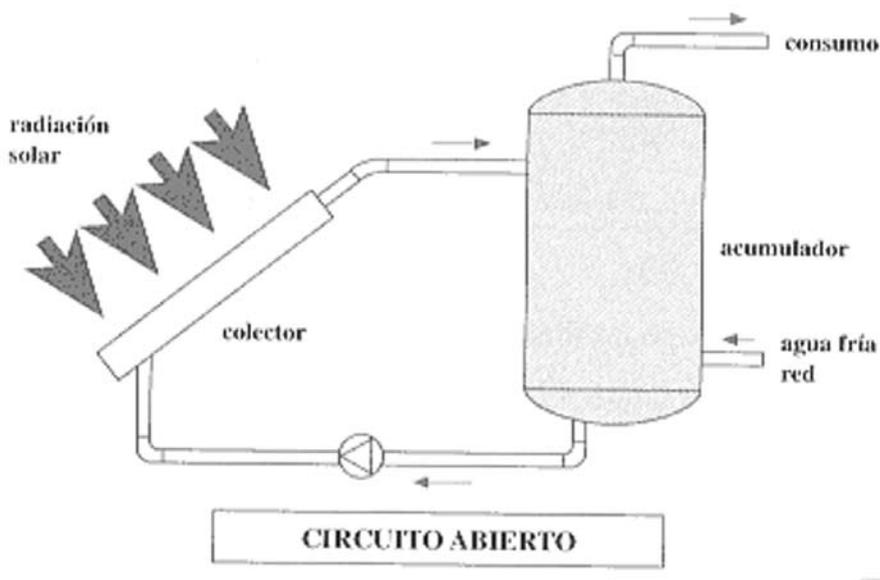


Figura 6. Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura de circuito abierto.

Instalaciones de circuito cerrado (sistemas con recirculación)

En éstas existen dos circuitos diferenciados, el primario y el secundario, que mantienen separados el fluido que circula por los colectores y el agua de distribución o de consumo. Uno de los problemas de las instalaciones para agua caliente sanitaria radica en la temperatura de congelación del agua. En lugares con climas adversos puede ocurrir que el agua que circula por el interior de los colectores se congele disminuyendo así la eficiencia del colector. En estas instalaciones, el fluido que circula por los colectores puede sustituirse por un fluido con un punto de congelación inferior al del agua. Un esquema de estas instalaciones puede observarse en la figura 7.

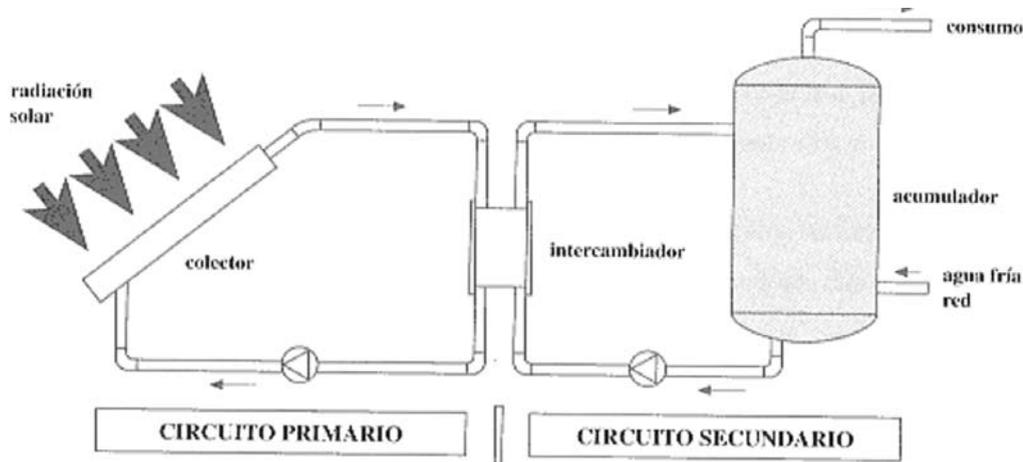


Figura 7. Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura de circuito cerrado

Otra clasificación de las instalaciones solares térmicas para agua caliente sanitaria puede realizarse teniendo en cuenta la circulación del fluido en el colector. Existen dos tipos:

Sistemas con termosifón (circulación por convección)

Se basa en la convección natural para hacer circular el fluido por los colectores, aprovechando la diferencia de temperaturas entre el fluido frío del depósito y el caliente del colector. Así, en estas instalaciones es preciso colocar el acumulador más elevado que el colector, como se aprecia en la figura 7. El fluido calentado por la radiación tiende a ascender, ya que debido al calentamiento disminuye su densidad y por tanto su peso. El fluido frío baja desde el fondo del depósito hacia el colector y empuja al fluido caliente que se encuentra en el colector, obligándolo a ascender y creando así el movimiento del colector al depósito. Un diagrama de este ciclo se presenta en la figura 8.

Sistemas por circulación forzada

El fluido, tanto en el circuito primario como en el secundario, se hace circular mediante una bomba mediante la regulación correspondiente, a través de un termostato diferencial que controla el diferencial de temperaturas, figuras 9 y 10.



Figura 7. Instalación para suministro de agua caliente sanitaria con energía solar térmica mediante equipo compacto termosifónico.

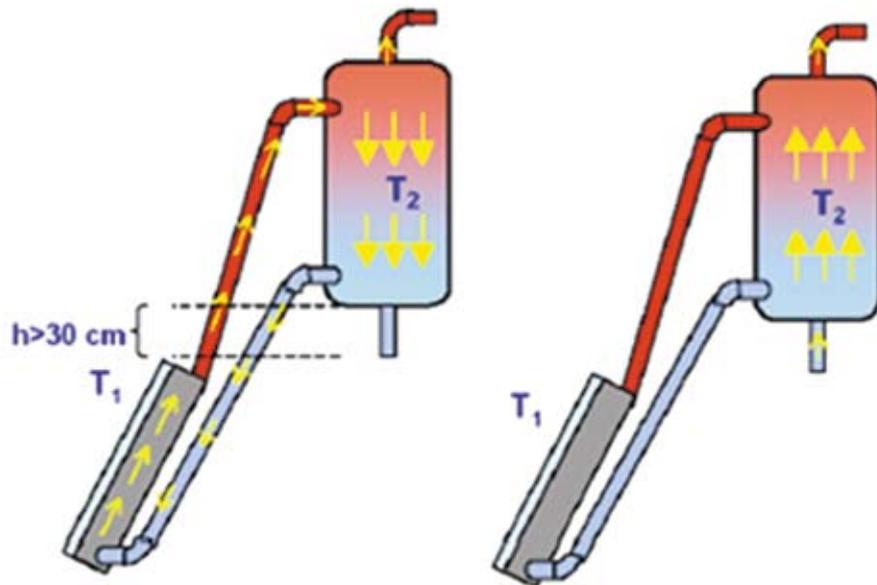


Figura 8. Funcionamiento de un sistema mediante termosifón.



Figura 9. Sistema forzado para agua caliente sanitaria.

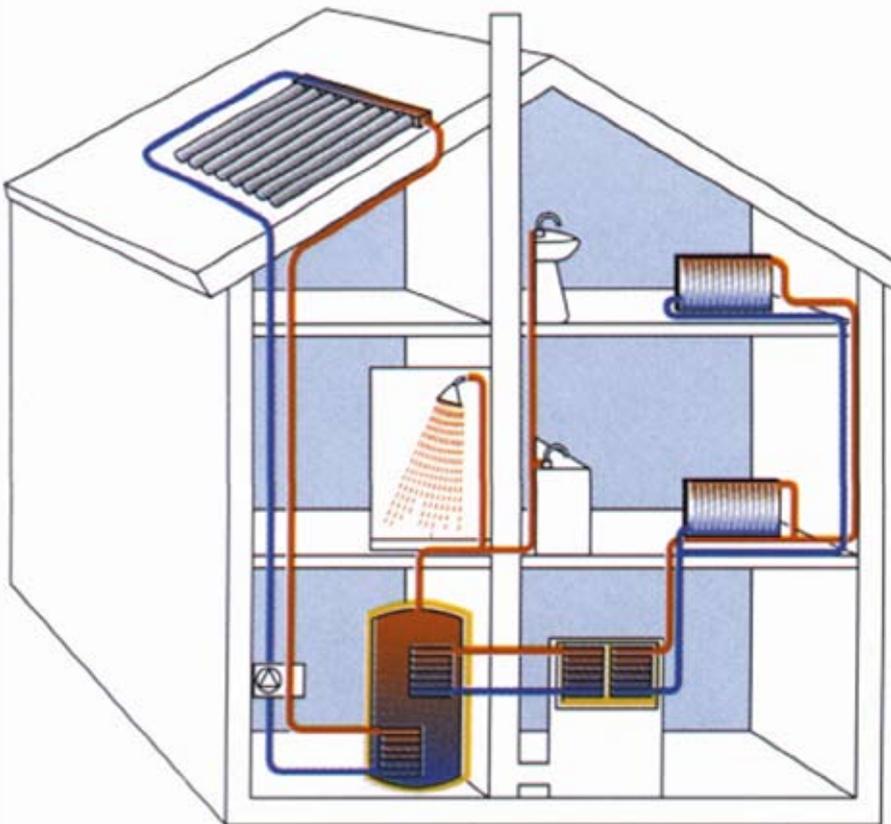


Figura 10. Sistema forzado para agua caliente sanitaria.

Calentamiento de piscinas

La energía solar térmica de baja temperatura es una de las opciones más interesantes para suministrar agua caliente a bajo coste en la climatización de piscinas de cualquier dimensión tanto exteriores como interiores, debido a que la temperatura de mantenimiento está entre 24 °C y 27 °C. Adquiere toda su relevancia en las piscinas exteriores, ya que existen normativas en todos los países europeos que impiden que el calentamiento de las mismas pueda ser realizado mediante las energías convencionales, salvo excepciones, y nunca superando la temperatura de 25 °C, figura 11.



Figura 11. Calentamiento de piscinas.

Otra ventaja del uso de la energía solar térmica para calentar el agua de una piscina es la de poder ampliar los meses de baño. Una piscina al aire libre no calentada tiene un ciclo anual de temperatura que varía según el clima y la ubicación geográfica. Esto limita, en la mayoría de los casos, la utilización de las piscinas al aire libre a los meses de verano. Sin embargo, la posibilidad de utilizar una piscina al aire libre, que normalmente cubre un período de tiempo de aproximadamente tres meses, puede ser prolongada hasta cinco o seis meses en los climas más templados si se calienta el agua mediante energía solar. Por ejemplo, a partir de abril o mayo, son frecuentes los días soleados en que apetecería un baño en la piscina, pero la temperatura del agua de la piscina no lo permite, al igual que a partir de octubre, figura 12.

Este calentamiento puede facilitarse enormemente si además del sistema térmico disponemos de algún mecanismo para cubrir la zona de baño, en las temporadas más frías o simplemente una manta térmica para el periodo nocturno.

Sin embargo, el diseño analítico de un conjunto de colectores para la conservación de la temperatura del agua de una piscina al aire libre es complejo a causa de la inestabilidad de las condiciones climáticas, que influyen de forma notable sobre las dispersiones térmicas de la piscina. El viento puede

provocar enormes pérdidas, tanto por convección como por evaporación del agua de la superficie de la piscina. Asimismo las pérdidas por radiación nocturna son también variables.

Un esquema de una instalación solar de baja temperatura para calentar piscinas puede verse en la figura 13.



Figura 12. Calentamiento de piscinas.

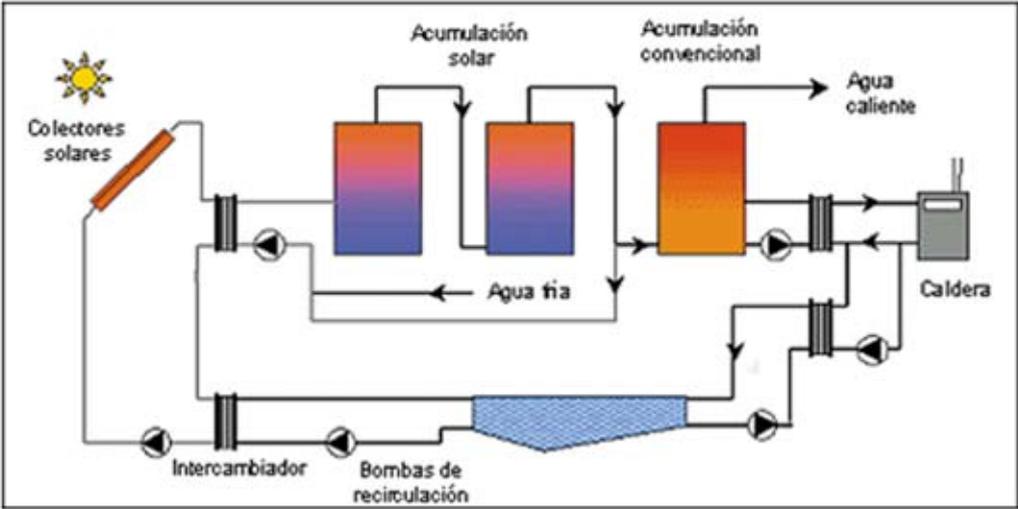


Figura 13. Esquema de instalación solar para calentamiento de piscinas.

Dependiendo de las características de la piscina se puede pensar en diferentes instalaciones. El modo más sencillo y barato es la de intercalar en el circuito de depuración de la piscina el agua calentada por los paneles solares, de tal manera que es el agua de la piscina, impulsada por la bomba de depuración, la que circula a través de los paneles. Así, para calentar el agua de la piscina únicamente es necesario activar el circuito de depuración, utilizando el mismo motor para calentar y depurar. Cuando la piscina se utiliza todo el año se utilizan dos circuitos, primario y secundario, utilizando anticongelante en el circuito primario.

En viviendas pueden realizarse instalaciones que en verano climaticen la piscina y en invierno apoyen la calefacción y de este modo aprovechar la instalación. En recintos deportivos también se pueden combinar el consumo de piscinas y duchas optimizando las instalaciones durante todo el año.

Climatización

Calefacción por suelo radiante

Otra aplicación de la energía solar de baja temperatura es la calefacción. Aquí nos tropezamos con la desventaja de que la demanda de energía para calefacción es máxima cuando la disponibilidad de energía solar es mínima. No obstante, resulta una aplicación interesante si se emplea una superficie colectora amplia, mayor que en el caso del agua caliente y se combina con sistemas de calefacción que trabajen a baja temperatura. La calefacción por suelo radiante es uno de los sistemas de distribución del calor que mejor se adapta a la energía solar. En este sistema se hace circular por los tubos de la calefacción agua entre 35 °C y 45 °C y de esta forma el suelo se mantiene entre 20 °C y 28 °C. La temperatura ambiente se encuentra entre 20 °C y 22 °C.

Un esquema de una instalación solar de baja temperatura para calefacción por suelo radiante puede verse en la figura 14.

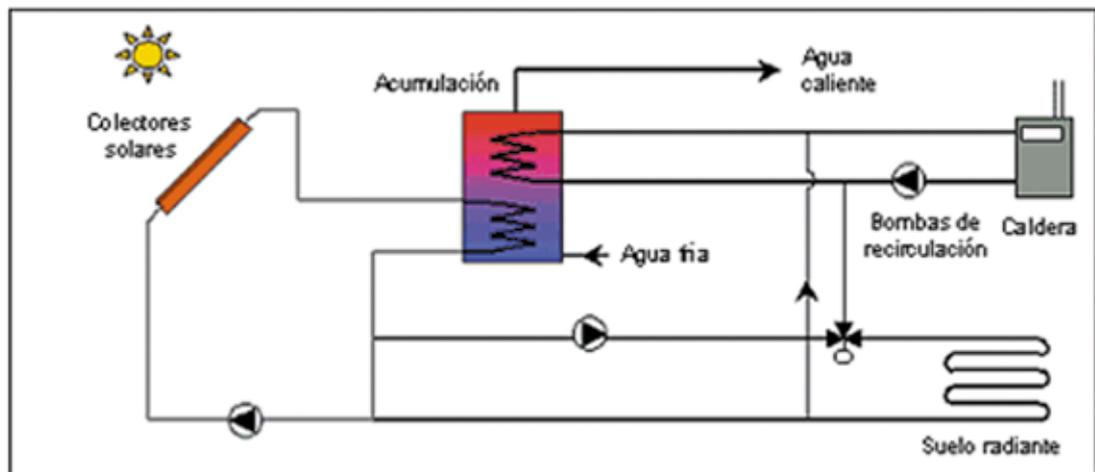


Figura 14. Esquema de instalación solar para calefacción por suelo radiante.

En estas instalaciones se pueden utilizar colectores planos o bien colectores de vacío, con temperaturas superiores a 70 °C. En los colectores se puede utilizar un fluido especial caloportador calentando con el agua del circuito del circuito de calefacción. Otra posibilidad es la de generar agua caliente los paneles e introducirla directamente en el circuito de calefacción. En ambas opciones se reduce el consumo de combustible o electricidad.

Las necesidades de suministro de calor auxiliar con energía convencional en días nublados y muy fríos se pueden reducir al mínimo si el edificio tiene un buen aislamiento térmico. En los días soleados prácticamente se logra una calefacción sin hacer uso del sistema complementario de calefacción.

El grado de confort que se consigue con este tipo de calor es ideal ya que es uniforme en toda la vivienda y el calor es mayor en la zona próxima al suelo, como se puede observar en la figura 15, al contrario que el calor emitido por un radiador convencional.

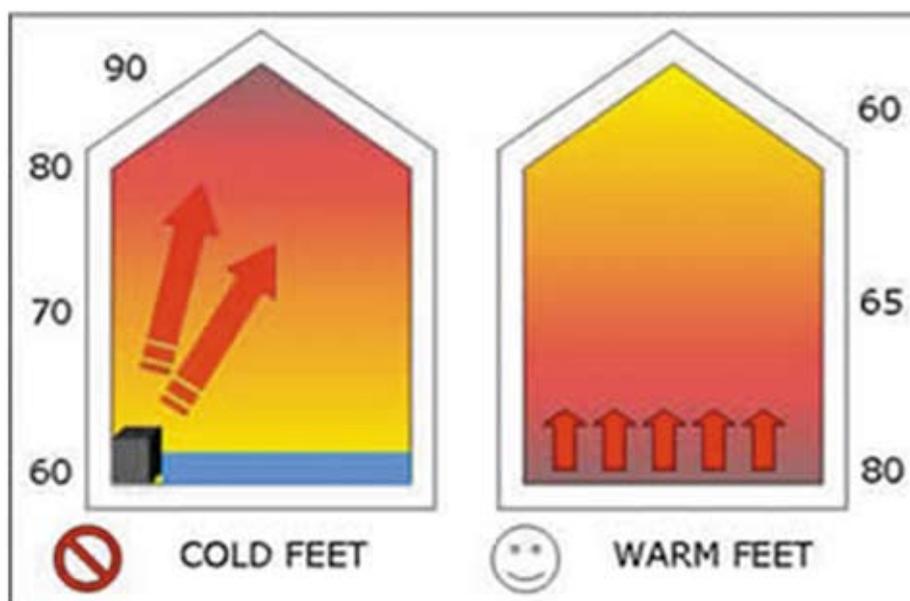


Figura 15. Distribución del calor generado por la calefacción por suelo radiante

Una posibilidad es la de combinar el uso de la instalación con la refrigeración, consiguiendo una climatización completa a lo largo de todo el año.

La instalación de calefacción por suelo radiante consiste en insertar entre la capa aislante del suelo y la red o mallazo un serpentín de tubos plásticos por donde circulará el agua caliente. Un ejemplo de colocación puede verse en la figura 16.

Refrigeración

En los últimos años se ha producido un crecimiento de las necesidades de refrigeración en los edificios, tanto por una mayor exigencia de las condiciones de confort como por un aumento de las cargas tér-

micas. Habitualmente la demanda de refrigeración es cubierta por electricidad, hecho que provoca puntas de consumo considerables en las redes de distribución eléctricas durante los meses de verano. La energía solar térmica puede ser utilizada para accionar sistemas de refrigeración, presentando en este caso una ventaja adicional a las ya ofrecidas por las energías renovables, ya que las máximas necesidades de frío coinciden con la máxima disponibilidad de energía solar. Resulta especialmente interesante si se combina con otras aplicaciones, como calefacción, agua caliente sanitaria o climatización de piscinas.

Las tecnologías de refrigeración que se pueden acoplar a un sistema solar son las máquinas enfriadoras térmicas, tanto las de absorción como las de adsorción, y los procesos de desecación y enfriamiento evaporativo.

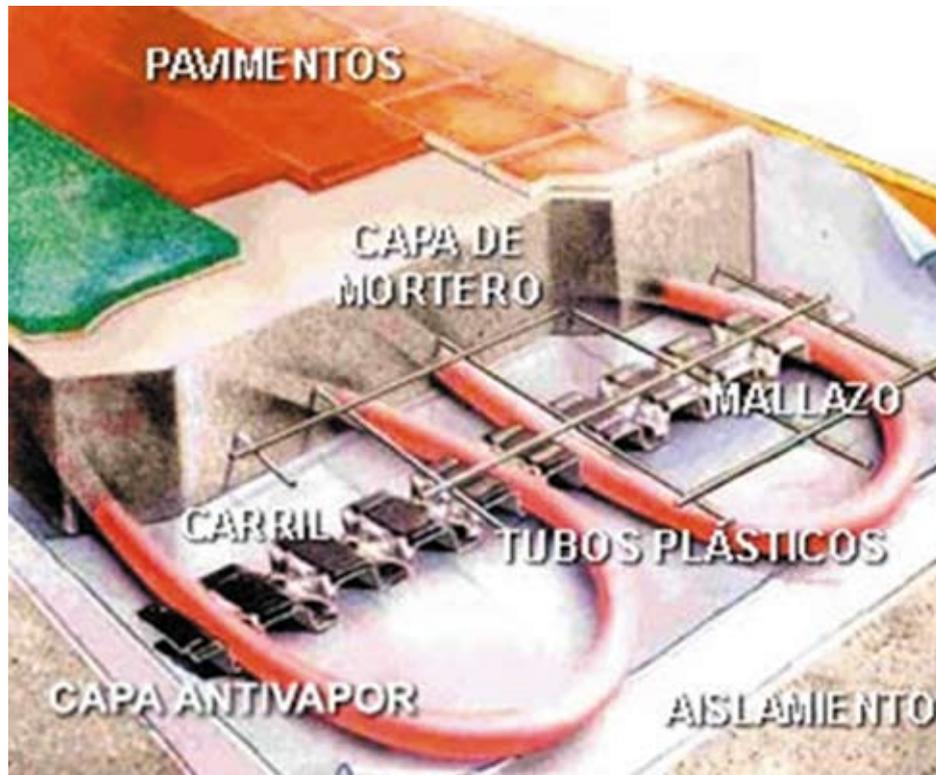


Figura 16. Instalación de calefacción por suelo radiante.

- Refrigeración solar por absorción

La refrigeración mediante máquina de absorción se basa en que un líquido que se evapora absorbe gran cantidad de calor de su entorno. Empleando los fluidos apropiados, y mediante ciclos sucesivos de expansión y condensación, podemos obtener temperaturas tan bajas como deseemos, hasta el punto de congelación. En este caso, la energía solar térmica se obtiene para proporcionar la energía que necesita el sistema de absorción para funcionar. Esta tecnología requiere que la instalación solar trabaje con un rendimiento aceptable a las temperaturas requeridas por la máquina de absorción, entre 90 °C y 100 °C, lo que requiere el empleo de colectores de vacío o colectores planos de alto rendimiento. Al igual que el

resto de instalaciones solares, los sistemas solares de refrigeración por absorción necesitan un sistema auxiliar de apoyo.

En función del fluido refrigerante y absorbente que se utilice, las máquinas de absorción se pueden dividir de la forma que muestra la tabla I.

Tabla I. Clasificación de las máquinas de absorción

Denominación	Refrigerante	Absorbente
bromuro de litio	agua	bromuro de litio
amoníaco	amoníaco	agua

La eficiencia de las máquinas de absorción en producción de refrigeración viene determinada por la relación entre el frío producido y la energía térmica empleada para producirlo. Este parámetro es conocido como *Coefficient of Performance* (COP).

Los colectores solares apropiados para un determinado sistema de refrigeración vienen determinados por el COP. Las máquinas de absorción más aplicadas en climatización son las de bromuro de litio. Estas máquinas tienen un COP de 0,6 - 0,7 y pueden funcionar con agua caliente a partir de 80 °C, siendo los colectores planos de alto rendimiento los apropiados.

En el esquema de la figura 17 se muestra una posible configuración de un sistema de refrigeración por energía solar. El sistema solar cuenta con un tanque de acumulación con el fin de amortiguar los desfases entre la disponibilidad de la radiación solar y la carga frigorífica. También existe una caldera de apoyo que garantiza a la máquina de absorción la disponibilidad de energía la necesaria para su funcionamiento en todo momento, figura 18.

- Refrigeración solar por adsorción

En las máquinas de adsorción, a diferencia de las de absorción, se utiliza un adsorbente sólido en lugar de un absorbente líquido. En estas máquinas el ciclo de funcionamiento no es continuo, sino que tiene una fase de carga y una de descarga. El COP de estas máquinas se encuentra entre 0,55 – 0,65, pudiendo ser la temperatura de la fuente caliente inferior a la de las máquinas de absorción, a partir de 55° C, lo que permite el uso de captadores planos.

La tecnología de adsorción se utiliza preferentemente en refrigeración industrial utilizando una combinación de agua/silica gel como refrigerante/ absorbente.

- Refrigeración solar por desecación y refrigeración evaporativa

Este sistema consiste en un ciclo en el que el aire a climatizar es primeramente secado y después enfriado por humidificación. Trata por separado la carga latente y sensible, lo que permite un control muy preciso de las condiciones de confort, figura 19.

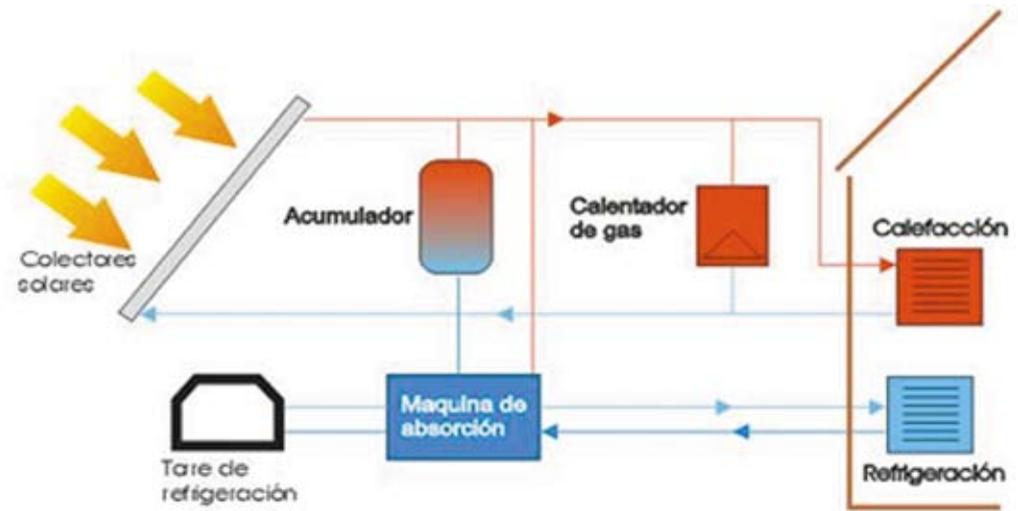


Figura 17. Esquema de una instalación de climatización solar con máquina de absorción.



Figura 18. Instalación de climatización solar con máquina de absorción

Procesos especialmente indicados para la aplicación de energía solar son el calentamiento de baños líquidos, calentamiento de aire en procesos de secado o la producción de frío mediante máquinas de absorción.

En la mayoría de los procesos industriales donde se puede aplicar esta tecnología, las instalaciones solares se encuentran con el problema de disponer de un espacio disponible limitado para la colocación de la superficie colectora. Los colectores solares suelen ser colocados en la cubierta de la nave industrial, por encontrarse cerca del lugar de uso del calor.

En numerosas ocasiones el agua caliente es necesaria en la industria para desarrollar determinados procesos de producción. La energía solar puede ser utilizada en este caso bien para calentar el agua utilizada en el proceso o bien para precalentarla, en el caso de que las temperaturas de trabajo sean muy elevadas. A este tipo de aplicaciones se las denomina de Agua Caliente Industrial (ACI). Cuando las temperaturas de trabajo se aproximan a las del agua caliente sanitaria pueden ser utilizados las mismas instalaciones que fueron descritas en el apartado 2.1.

Algunos ejemplos de aplicaciones industriales de baja temperatura son los siguientes:

- Lavado de botellas
- Separación de fibras
- Túneles de lavado de coches
- Descortezados
- Tratamiento de alimentos
- Lavado de textiles

Desalinización

Nuestro Planeta sufre una escasez cada vez mayor de recursos hídricos. La sobreexplotación de los recursos disponibles y el aumento de la población mundial provocan que éste sea uno de los principales retos a los que se enfrenta nuestra sociedad. En la actualidad se investiga para que las técnicas de desalación a través de la tecnología solar térmica puedan llegar a ser una fuente sostenible para la obtención de estos recursos hídricos, cada vez más escasos. Los sistemas de desalación solar térmica se dividen en dos grandes grupos según su configuración: directa, en la que el colector y el destilador están integrados, e indirecta, en la que están compuestos por elementos bien diferenciados. En el presente apartado se analizarán los primeros, quedando para otros documentos complementarios los de desalación solar indirecta.

Generación de electricidad

La producción electricidad a partir de la energía solar, se basa en la utilización de generadores eléctricos de tecnología convencional, similares a los usados en una central térmica o nuclear, con la diferencia de que la energía térmica necesaria para impulsar al fluido a través de los álabes, de la turbina que mueve al generador, es producida a su vez por la energía solar térmica, pero para ser eficiente energéticamente hablando, ésta debe ser recogida y concentrada a fin de poder alcanzar las altas temperaturas que el proceso requiere. Este procedimiento no es apropiado en bajas temperaturas ni a pequeña escala.

CTE

Código Técnico de la Edificación. De obligado cumplimiento para nuevas viviendas y reformas:
<http://www.codigotecnico.org/index.php?id=33>

CAPÍTULO 9

Energía Solar: Fotovoltaica

Antonio Luque

Instituto de Energía Solar (IES), UPM.

Premio Rey Jaime I a la Protección del Medio Ambiente 1999

La conversión de la energía luminosa en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico se realiza mediante las llamadas células solares. Una célula solar está hecha de semiconductor que es un material en el que los electrones, habitualmente en la llamada banda de valencia, una vez excitados por la luz, pasan a una banda más energética llamada banda de conducción y permanecen en ella durante un tiempo suficientemente largo (si el semiconductor es lo bastante puro) como para poder ser aprovechados en este estado más energético. Para permitir este aprovechamiento la célula solar tiene contactos selectivos a la banda de conducción (contactos “óhmicos” a una región tipo n) por los que salen los electrones más energéticos, que tras perder su energía en un circuito exterior al realizar un trabajo útil, son devueltos a la banda de valencia del semiconductor mediante un segundo contacto selectivo (contacto “óhmico a una región tipo p”).

Los principios básicos de la fotoelectricidad fueron descubiertos en 1905 por Albert Einstein [1], quien obtuvo por ello el Premio Nobel en 1921.

La industria fotovoltaica, aunque todavía pequeña, un 1.7% en 2004 de la industria de los semiconductores a la que pertenece, crece hoy a un ritmo muy elevado. El crecimiento medio entre 1996 y 2004 fue del 33.4% anual frente al 6.2% de la industria de los semiconductores en su conjunto. Entre las primeras compañías del mundo se cuentan multinacionales de la electrónica o del petróleo como Sharp, Kyocera, Sanyo, Mitsubishi, Shell o BP (ver Figure 3). Entre ellas se encuentra Isofotón, que facturando unos 120 millones de Euros en 2006 ocupó el undécimo puesto mundial (si atendemos a datos confirmados, según Photon International).

Muchas de las primeras compañías son grandes corporaciones del sector de la microelectrónica o de la energía, aunque algunas, como Q-Cells, son compañías dedicadas exclusivamente a la fabricación de células solares. Puede también apreciarse la preponderancia de compañías asiáticas, de Japón y más recientemente de China y Taiwán más recientemente que han quitado (junto con Alemania) a los EEUU (y

a España, que entre 2000 y 2002 fue el tercer país) las posiciones de cabeza entre los países productores de células solares (ver Figura 4).

De entre las compañías en la lista de la Figura 3, sólo Isofotón y Sunpower son spin-offs de universidades (UPM y Stanford, respectivamente). En 1981 tuve el honor de encabezar la fundación de Isofotón, aunque hoy no tengo vinculación societaria alguna con esta sociedad.

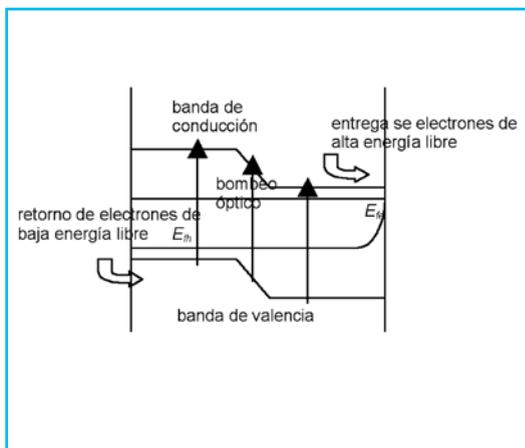


Figura 1. Esquema del principio de una célula solar

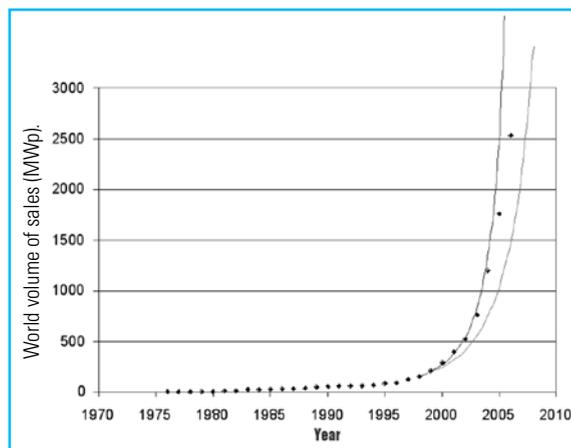


Figura 2. Puntos, diferentes fuentes, principalmente Paul Maycock, PV news en los diferentes años Photon International, Marzo 2007. Líneas: Previsiones alta y baja según el modelo en referencia [2]

Hoy día la industria el crecimiento de la industria fotovoltaica se resiente de la escasez de silicio ultra puro. El silicio es el segundo elemento (tras el oxígeno) más abundante de la corteza terrestre, pero las células solares necesitan, para dar ocasión a que los electrones más energéticos puedan ser extraídos con alta energía, de un silicio altamente purificado que se suele llamar polisilicio. Hasta ahora la industria fotovoltaica había venido usando una pequeña fracción del disponible para la microelectrónica (pureza: 1 ppb de átomos extraños), que a su vez es solo un 5% de la producción mundial de silicio de grado metalúrgico (pureza 98%), pero aquel ya no es suficiente en cantidad. En 2004 la industria fotovoltaica consumía ya el 42% de todo el polisilicio del mundo (ver Figura 5). En realidad el peso en coste de este polisilicio en un módulo fotovoltaico es del 20% frente al 0.63% en promedio en un componente semiconductor. Esto explica que sólo hubiera seis compañías en el mundo dedicadas a la purificación del polisilicio, las cuales suministraban a toda la industria de los semiconductores incluida la de las células solares. De hecho ni una compañía como INTEL, que detenta el 10% de la producción de la industria mundial de los semiconductores, consume polisilicio que produce una compañía media de ultra purificación. Pero la falta de previsión de los industriales de ambos sectores ha provocado una crisis —la escasez de polisilicio— que va a cerrarse con cambios profundos en la industria de la ultrapurificación. Es concebible que en el futuro las compañías importantes de células solares tengan su propia planta de purificación de polisilicio, adaptadas a sus necesidades.

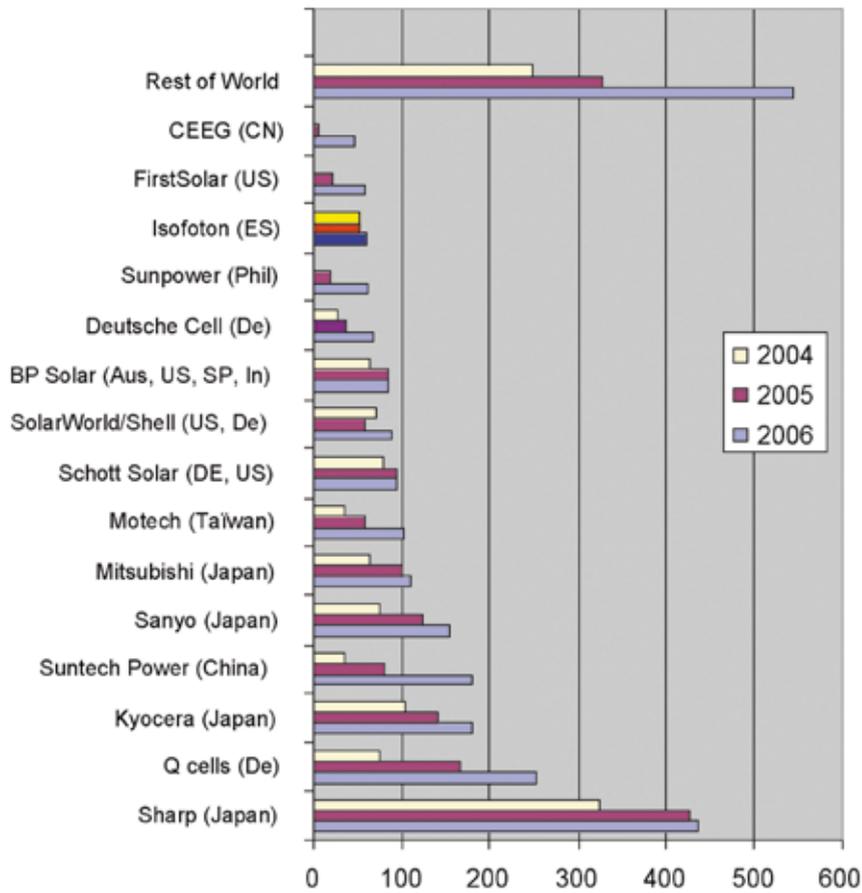


Figure 3. Los 15 mayores fabricantes de células solares. Fuente: Photon International, March 2007

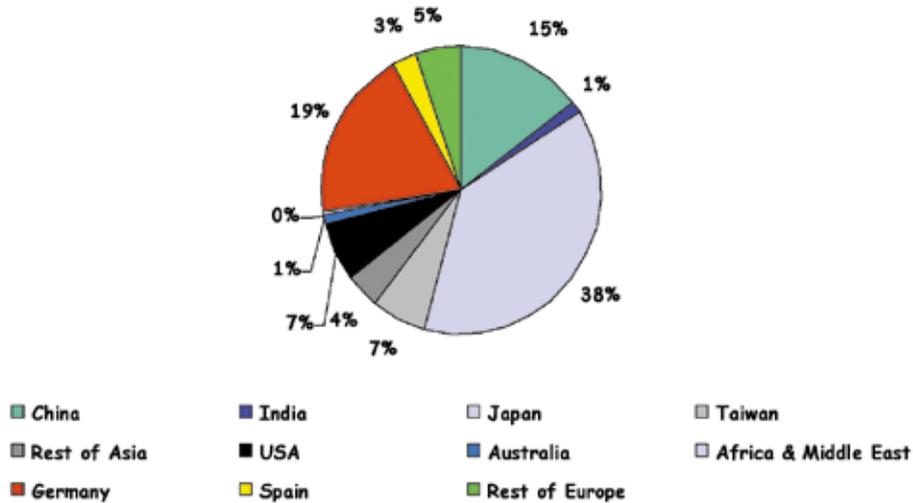


Figure 4. Producción mundial de células solares en 2006. Fuente: Photon International, March 2007

La escasez de silicio purificado ha afectado profundamente a la industria fotovoltaica en España, importante pero poco sólida (porque la integración vertical de tecnologías en España es todavía débil, aunque este defecto se está remediando), lo que ha hecho perder puestos de cabeza a las dos compañías españolas de fabricación de células solares (Isofotón y BP Solar), lo que ha dado lugar a ceder puestos como país fabricante. La urgencia del problema ha resultado por el momento en dos anuncios de construcción de fábricas purificación de polisilicio en España. En ningún caso se trata de que una de las compañías que hoy poseen la tecnología vaya a instalarla en nuestro país (los actuales poseedores de la misma son muy celosos de mantenerla en exclusiva), pero más bien de que inversores españoles van a correr riesgos tecnológicos (declarados o no) con agentes nuevos.

Pero junto a las acciones antes dichas, en España hay varias iniciativas para atacar el problema del silicio desde un desarrollo tecnológico declarado. Una de ellas la encabeza Ferroatlántica que pretende usar métodos metalúrgicos refinados. Nosotros, en UPM, colaboramos con ellos fabricando células con su silicio para cerrar el bucle que debe realimentar la investigación.

Por otra parte, hemos constituido en la UPM, juntamente con la UCM, y las empresas Isofotón, Técnicas Reunidas y DC Wafers, un centro de tecnología del silicio (CENTESIL) para creación de una planta piloto de investigación de 50 tm/año para ultra purificar silicio. El tamaño de una línea industrial es de 1000 tm/año, pero los resultados de la planta piloto serán escalables. Se trata de una iniciativa importante de unos 20 millones de Euros, cuya financiación está todavía incompleta.

Una alternativa a las de silicio son las células de capas delgadas. En ellas se ha puesto mucha esperanza por su presumible capacidad de fabricación más barata pero su rendimiento es inferior. Además los procesos de fabricación son difíciles y se controlan mal. En consecuencia, su comercialización ha sido muy pequeña. Es probable que con la presente escasez de silicio nuevas tecnologías de capa delgada alcancen el mercado y aprendiendo de la experiencia lleguen a constituir una opción alternativa y más barata a las células de silicio cristalino. Hay abundante capital apostando por esta vía y hay un número de compañías que han iniciado el desarrollo de esta tecnología tanto en Europa como en EEUU o Japón. No obstante nadie se atreve a predecir que el silicio cristalino vaya a ser desbancado de su primacía en los próximos 10 o 15 años, el tiempo que seguramente se ve a necesitar para alcanzar los costes de competencia con la electricidad vendida al usuario, según predice la Photovoltaic Technology Platform, que es un órgano consultivo de la Comisión Europea (ver Figura 6).

En todo caso mi propia previsión [2] es que si bien la fabricación de células solares con la presente tecnología va a crecer muchísimo no es probable que con ella alcance en los próximos cincuenta años el nivel de precios que le permitiría producir una fracción importante de la electricidad mundial y de ese modo contribuir de manera decisiva a paliar los efectos medioambientales de la producción de energía.

Este argumento es compartido de forma independiente por la petrolera Shell, que estima que nuevas formas de energía renovables van a tener un liderazgo en la generación de energía hacia mediados del presente siglo (ver Figura 7). En el contexto de su estudio, estas formas de energía estarán asociadas a nuevos conceptos en la explotación fotovoltaica de la energía solar con algún tipo de modo de acumulación probablemente asociado con la tecnología del hidrógeno.

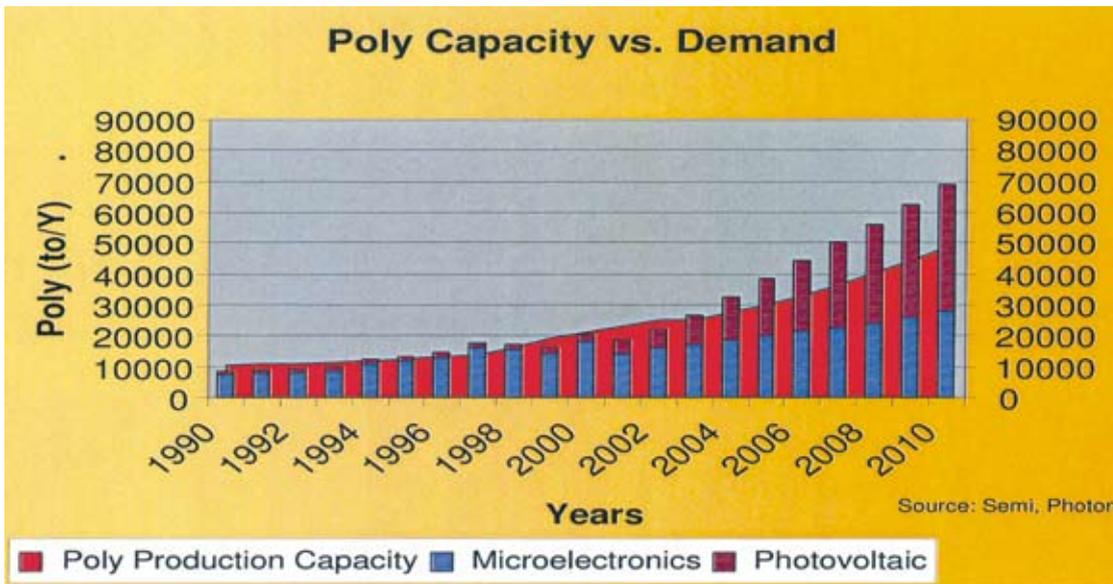


Figure 5. Producción de polisilicio para microelectrónica y fotovoltaica. Proyección hacia el futuro.

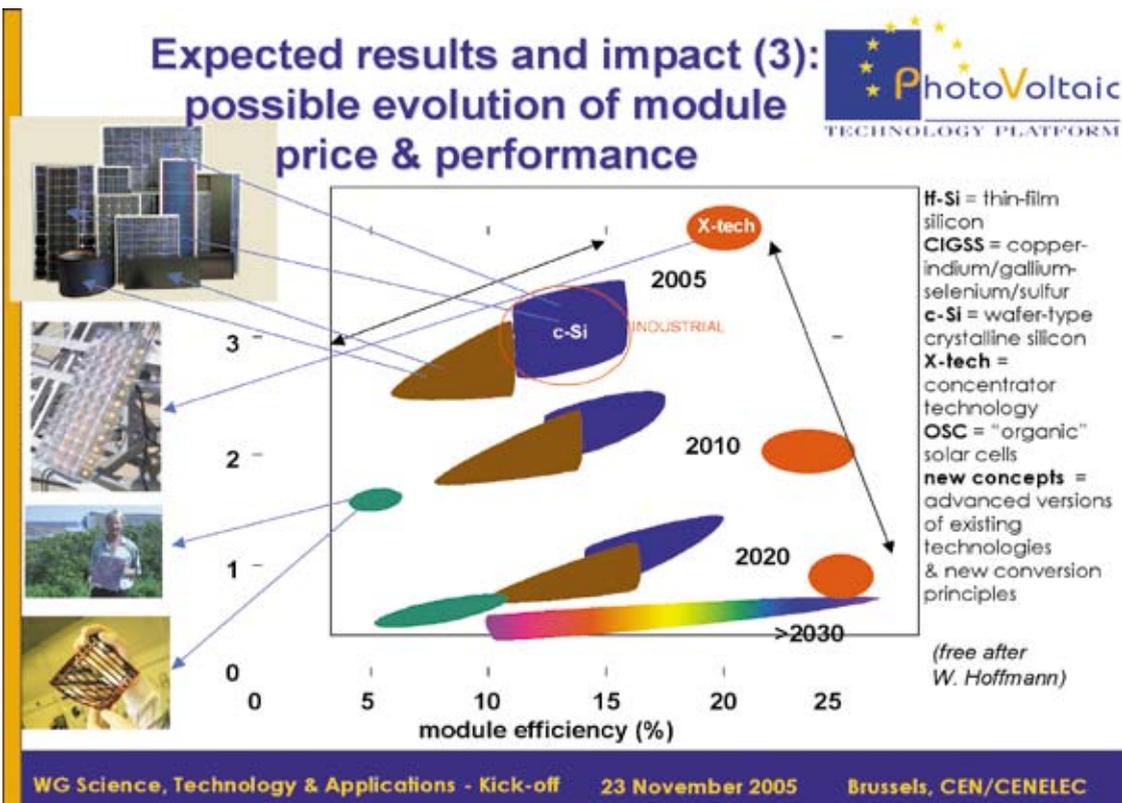


Figura 6. Rendimiento y precio de las familias tecnológicas según aceptan muchos expertos. Sólo lo que está dentro de la elipse de línea roja es industrial hoy, con ventas significativas.

Pero nuevos conceptos se están gestando ya en el sector fotovoltaico que pueden convertir la energía solar en electricidad con mucho más rendimiento, básicamente porque pueden aprovechar mucho mejor el espectro solar. De hecho, el efecto fotovoltaico, tal como se emplea hoy, no permite un uso lo bastante eficiente del recurso solar que es un recurso inmenso pero disperso. Por ello, organizamos en 2002 en Cercedilla, con el patrocinio de la Comisión Europea, un seminario al que invitamos a dos docenas de

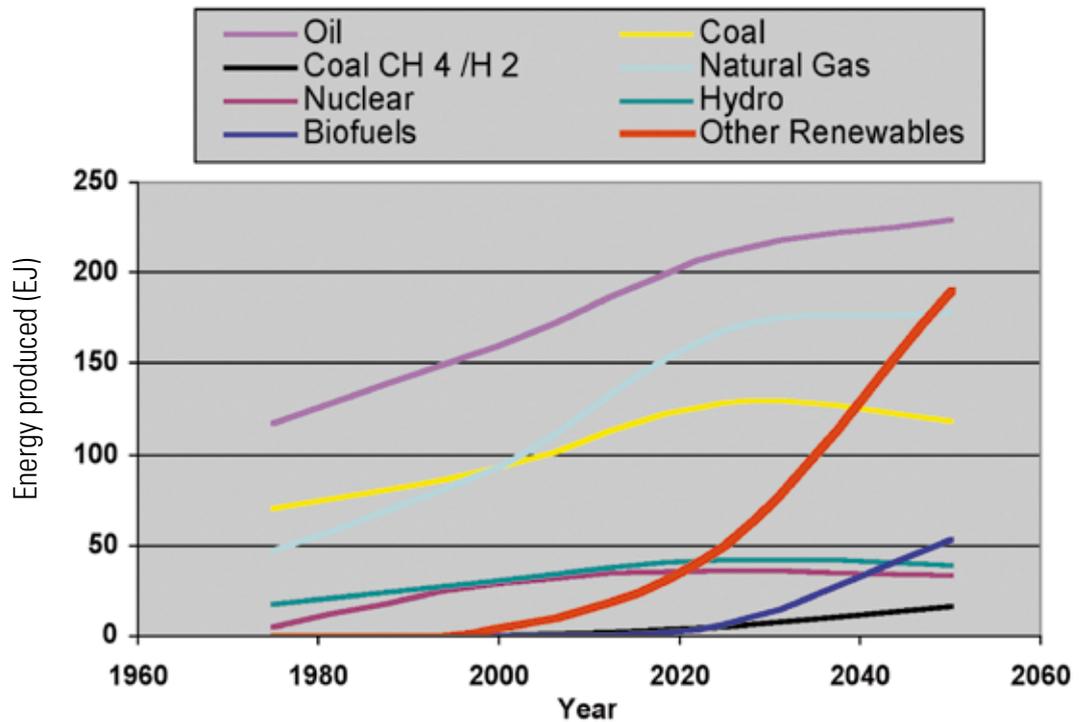


Figure 7. Escenario de suministro energético de Shell. Fuente: "Exploring the Future. Energy Needs, Choices and Possibilities. Scenarios to 2050" (Shell International 2001) "Other Renewables" es principalmente fotovoltaico y/o fotoquímico.

especialistas (incluyendo al Nobel Alferov) para examinar el problema lo que dio lugar a una publicación que consideramos importante [3]. Basándose en este trabajo conseguimos en 2003 un Proyecto Integrado (FULLSPECTRUM) [4] financiado por la Comisión Europea, que asocia 19 centros bajo nuestra coordinación, en el intento crear el ambiente intelectual para la generación de un invento revolucionario en fotovoltaica que aproveche mejor el espectro solar. El proyecto se aborda en buena medida desde una perspectiva de ciencia básica. Aunque incluye también el concepto de célula multiunión que se había desarrollado ya para las células solares usadas en aplicaciones espaciales con idea de adaptarlas al uso terrestre.

En una célula normal sólo los fotones con energía próxima a la diferencia energética entre la banda de valencia y la de conducción (hiato o gap) pueden ser convertidos eficientemente en electricidad. Los fotones más energéticos pierden todo el exceso sobre el hiato. Los fotones menos energéticos se pierden totalmente ya que los semiconductores son transparentes a ellos. Una solución para evitar este inconveniente es fabricar apilamientos monolíticos (es decir obtenidos por deposición de múltiples capas forman-

do una sola célula solar, aunque muy compleja) de varios materiales. En el momento actual rendimientos increíbles del 40.7% (diciembre 2006) han sido ya alcanzados por la compañía americana Spectrolab y del 42.8% (en julio de 2007, aunque en una configuración no monolítica) por un consorcio liderado por la Universidad de Delaware bajo financiación del departamento de Defensa de los EEUU. En el consorcio FULLSPECTRUM hemos alcanzado 35% en 2005 en un subproyecto liderado por el Instituto Fraunhofer de Friburgo y las fabrica Azur Space (antes Telefunken).

Naturalmente estas células son extremadamente caras pero pueden usarse de forma competitiva usando luz concentrada. Isofotón lidera en FULLSPECTRUM el subproyecto de desarrollar el módulo de concentración adecuado.

En España se está gestando en este momento la industrialización de la nueva tecnología de concentración que pretende abaratar la electricidad fotovoltaica haciendo incidir sobre las costosas células multiunión más energía luminosa mediante elementos ópticos que enfocan el sol en las mismas. En 1989 dirigí la publicación [5], de la primera monografía (en lengua inglesa) dedicada a este tema. Se ha constituido en Castilla La Mancha —sobre la base de una idea de la UPM— un nuevo Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (ISFOC), con el objetivo de estimular el paso de prototipos de concentradores de laboratorio a líneas piloto de fabricación. Para ello se han sacado a licitación internacional plantas de concentración fotovoltaica con las nuevas células multiunión por valor de unos 16 millones de euros con la condición de que la oferta mínima fuera de 300 kW, ya ha concedido 1.7 MW a tres compañías: Solfocus (EEUU), Concentrix (Alemania) e Isofotón (España). En el momento actual la licitación se he abierto de nuevo para completar 1.3 MW adicionales. Esta acción podría ser el origen de una nueva tecnología con capacidad de bajar costes a niveles impensables para las tecnologías fotovoltaicas actuales.

Una de las razones del potencial de las células multiunión para bajar costes es su capacidad para subir rendimientos. Es posible que el límite práctico de redimiendo de este concepto se encuentre entre el 45-50%. Otro de los conceptos que maneja FULLSPECTRUM es el de célula solar de banda intermedia que propusimos en 1997 [6]. En un panel celebrado en Washington en la primavera de 2005 para estudiar el papel que podría jugar de la investigación básica al problema energético [7] (seminario en el que se usó como base la referencia [3]) se incluyó nuestro concepto de célula de banda intermedia como uno de los tres que consideraban en el epígrafe "células solares revolucionarias, con rendimientos por encima del 50%". De hecho pensamos que el desarrollo de las células de banda intermedia en combinación monolítica con células ordinarias o con otros nuevos conceptos permitiría recorrer en la práctica el rango de rendimientos entre el 50 y el 60%. Sin embargo, es preciso aclarar que estos nuevos conceptos no son triviales y necesitarán cierto tiempo para desarrollarse hasta niveles prácticos. En realidad necesitan materiales que hoy todavía no existen más que de forma incipiente.

En resumen, creo que no hago más que predecir la realidad si digo que la electricidad fotovoltaica está llamada a ser un elemento muy importante en el suministro de electricidad del futuro. La dimensión del recurso solar y la naturaleza de las tecnologías involucradas así lo garantizan. Este brillante futuro se esboza ya en el extraordinario crecimiento actual de la industria fotovoltaica que ya hoy factura (solo en células solares) mas de cuatro mil millones de euros anuales.

La situación científica e industrial de España en este sector es excelente. España juega en primera división. Mantenerse en ella no va a ser fácil. Cuanto más crezca el sector más necesitaremos que la sociedad española apoye nuestro afán. Pero tenemos fe en ella y esperamos conseguirlo.

Referencias

A. Einstein, "Über einen Erzeugung und Erwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Sichtspunkt," *Annalen der Physik*, vol. 17 p. 132 1905.

A. Luque, "Photovoltaic markets and costs forecast based on a demand elasticity model," *Progress in Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 9, pp. 303-312, 2001.

A. Martí and A. Luque, *NEXT GENERATION PHOTOVOLTAICS: High Efficiency through Full Spectrum Utilization*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2003.

A. Luque, A. Martí, A. Bett, V. Andreev, C. Jaussaud, J. A. M. v. Roosmalen, J. Alonso, A. Råuberg, G. Strobl, W. Stolzi, C. Algora, B. Bitnar, A. Gombert, C. Stanley, P. Wahnnon, J. C. Conesa, W. G. J. H. M. v. Sark, A. Meijerink, G. P. M. v. Klinko, K. Barnham, R. Danz, T. Meyer, I. Luque-Heredia, R. Kenny, C. Christofides, G. Sala, and P. Benítez, "FULLSPECTRUM: a new pv wave making more efficient use of the solar spectrum," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 87, pp. 467-479, 2005.

A. Luque, "Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration, Non-imaging Optics and Static Concentration," in A. Luque, Ed. Bristol: Adam Hilguer, 1989, p. 308.

A. Luque and A. Martí, "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels," *Physical Review Letters*, vol. 78, pp. 5014–5017, 1997.

N. S. Lewis, G. Crabtree, A. J. Nozik, M. R. Wasielewski, and P. Alivisatos, "Basic Research Needs for Solar Energy Utilization," US Department of Energy, Office of Basic Science 2005.

CAPÍTULO 10

Energía eólica

Sergio Martínez, Carlos Veganzones, Francisco Blázquez

*Grupo de investigación en Generación Eléctrica con Energía Eólica. ETSI Industriales.
Universidad Politécnica de Madrid*

Resumen

Este artículo presenta una panorámica general de la generación eléctrica con energía eólica. En primer lugar, se exponen algunas cifras que permiten dar una idea acerca de su evolución y estado de desarrollo, así como cuantificar su contribución en el conjunto de la generación eléctrica. Posteriormente, se describen las principales tecnologías utilizadas para la conversión de la energía del viento en eléctrica. Por último, también se enumeran algunos de los retos que plantea su utilización a gran escala.

Introducción

El aprovechamiento de la energía del viento, en especial, para la generación de electricidad, presenta indudables ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad, dado su carácter renovable y, particularmente, su carencia de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, y por su grado de madurez y de implantación actuales, constituye una importante opción energética en la lucha contra el cambio climático. Así lo han entendido numerosos gobiernos de los países más industrializados del mundo, que han implantado distintos mecanismos para incentivar su desarrollo [1].

En este artículo, se presenta una panorámica general de la generación eléctrica con energía eólica. Se dedica un primer capítulo a exponer algunas cifras que permiten dar una idea acerca de su evolución en los últimos años y de su estado de desarrollo actual. Asimismo, se cuantifica su contribución al conjunto de las diferentes fuentes de generación eléctrica, tanto en términos de potencia instalada como de energía producida para atender a la demanda.

Se dedica otro capítulo a describir las principales tecnologías utilizadas actualmente para la conversión de la energía del viento en eléctrica. Se describe la constitución y el funcionamiento de los aerogeneradores, y las peculiaridades de cada tipo.

Por supuesto, como ocurre con cualquier otra fuente energética, el uso de la energía eólica no está exento de dificultades. Por ello, se incluye un breve tercer capítulo en el que se describen algunos de los retos que plantea su utilización a gran escala.

La energía eólica en cifras

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad ha tenido una evolución en la última década que ha sobrepasado las perspectivas más optimistas. Un primer indicador de su importancia es la *potencia instalada*. Este término es una medida de la potencia (energía por unidad de tiempo) para la que se ha diseñado una instalación eólica. Es decir, indica la máxima potencia eléctrica que puede generar la instalación, cuando hay viento suficiente para ello.

Como primer dato, cabe mencionar que la potencia instalada en los parques eólicos de todo el mundo, a fecha de enero de 2007, era de 74 300 MW [2]. En cuanto a su evolución en los últimos años, la figura 1 representa la potencia instalada en los parques eólicos de los países miembros del Acuerdo para la Investigación y el Desarrollo de los Sistemas de Energía Eólica de la Agencia Internacional de la Energía (IEA R&D) [1], España entre ellos, los cuales representan el 87 % de la capacidad mundial. Es de destacar que el crecimiento sostenido ha llevado a un incremento del 1300 % en el periodo.

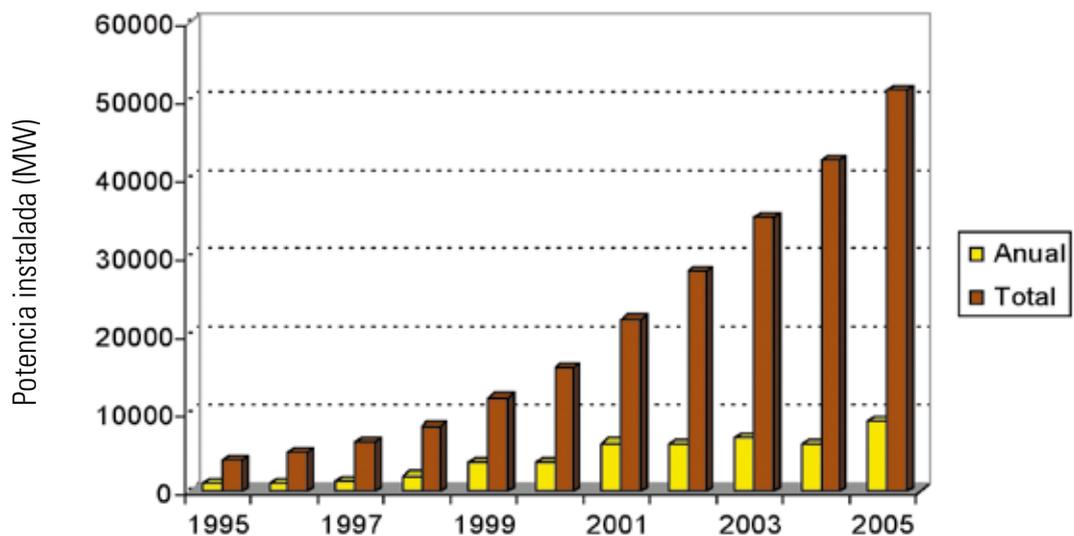


Figura 1. Potencia eólica instalada anual y acumulada en los países del acuerdo IEA R&D [1]

Especialmente significativa es la contribución de la Unión Europea, 48 000 MW, que representa el 65 % del total mundial [2]. La Unión Europea, ha optado por un modelo energético que posibilite el abastecimiento de electricidad minimizando las emisiones nocivas a la atmósfera. Para lograrlo, sus países miembros están aplicando una serie de políticas que promocionan e incentivan el uso de las energías renovables, tales como [1]: subvenciones a la instalación, primas a la energía producida, obligación de compra de la misma por parte de las empresas eléctricas o apertura de mercados a este tipo de energías.

Casos especialmente notables son los de Alemania, España y Dinamarca con una potencia eólica instalada de 20 622, 11 615 y 3 136 MW, respectivamente, a principios de 2007 [2]. Concretamente, en España, la potencia eólica instalada se ha multiplicado por 55 en el periodo de 1996 a 2006, como se muestra en la figura 2 [3], lo que la coloca actualmente en el segundo puesto mundial.

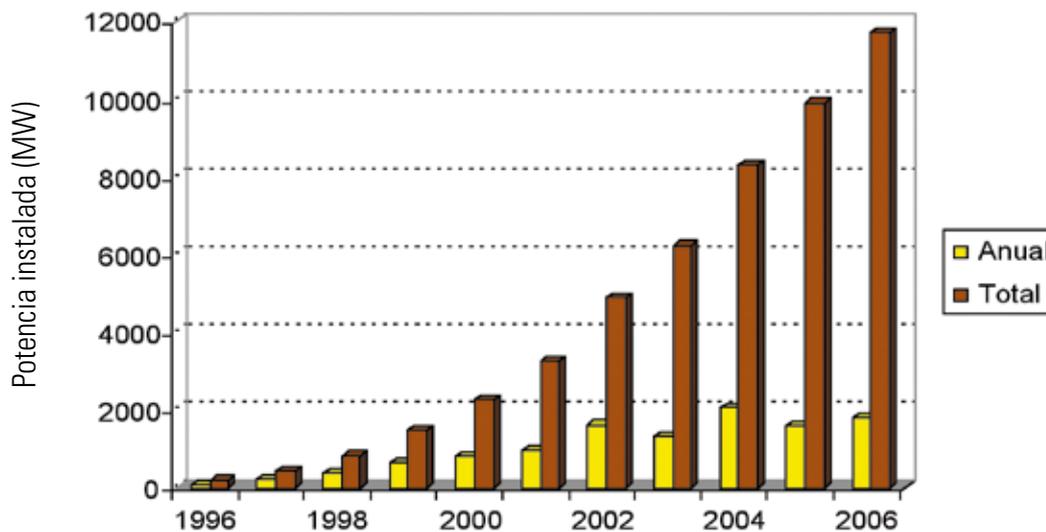


Figura 2. Potencia eólica instalada anual y acumulada en España

Para entender mejor la importancia de estas cifras, son particularmente interesantes los indicadores relacionados con la **energía** eléctrica producida a partir de la del viento. Así, los países del acuerdo IEA R&D generaron 100 TWh en el año 2005, lo que supone, en término medio, un 1,2 % de su demanda de energía eléctrica, destacando el caso danés, donde supuso el 18,5 %. La figura 3 muestra los porcentajes de cobertura de la demanda de energía eléctrica por tipo de energía primaria en España en el año 2006 [4].

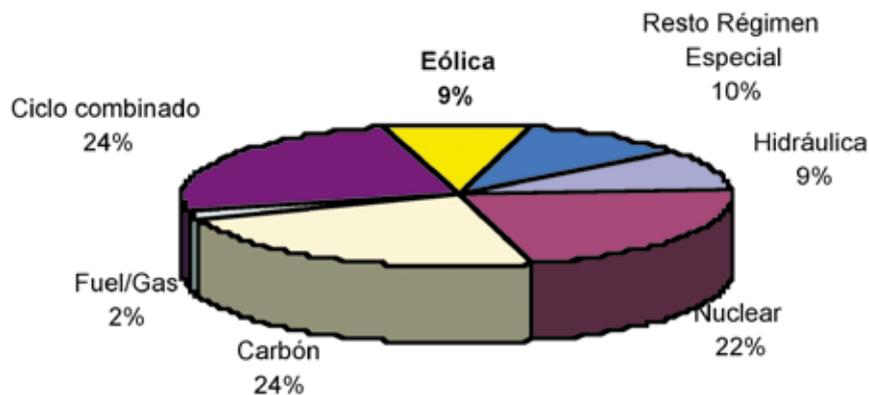


Figura 3. Cobertura de la demanda anual de energía eléctrica en España en el año 2006

En lo que se refiere al grado de madurez de la generación eléctrica con energía eólica, es interesante destacar una serie de indicadores, relacionados con el grado de confiabilidad, los costes o la eficiencia de las plantas de producción. Así, por ejemplo, la tecnología utilizada ha evolucionado hasta garantizar actualmente unos niveles de disponibilidad superiores al 98 % [1]. Los costes de los proyectos oscilan entre 970 (caso de los parques terrestres en España) y 2075 (parques marinos en el Reino Unido) euros por kilovatio de potencia instalada, y los costes medios de operación y mantenimiento están entre 7 (España y Suecia) y 10 (Italia) euros por MWh producido [1]. La evolución de la tecnología también se ha reflejado en un incremento de la potencia unitaria de los aerogeneradores, pasando de 330 kW en 1995 a 1500 kW en 2005, lo que ha permitido una mayor eficiencia en la conversión de energía. En el caso de España, esta evolución se puede observar en la figura 4, donde se representa la potencia asignada media de los aerogeneradores instalados en el último decenio [3].

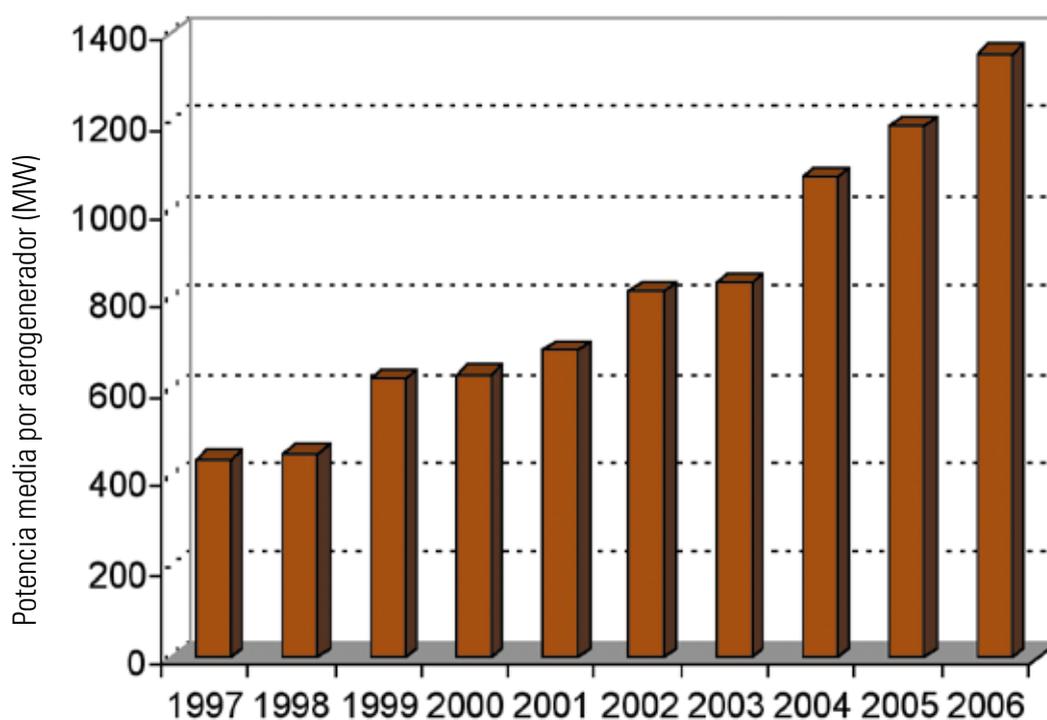


Figura 4. Evolución de la potencia media por aerogenerador instalado en España

Para finalizar este capítulo, cabe destacar que, aparte de los beneficios económicos derivados del aprovechamiento de la energía eólica -que se manifiestan en un subsector industrial de gran importancia en países como Alemania, España, Estados Unidos o Dinamarca, entre otros-, algunos de sus indudables beneficios medioambientales también se pueden cuantificar. La tabla 1 recoge algunos de estos indicadores en el año 2005 [1], a modo de ejemplo.

Tabla 1. Algunos indicadores medioambientales

País	La producción de energía eléctrica de origen eólico...	Indicador
Australia	fue equivalente a la retirada de la circulación de	651 720 automóviles
Alemania	supuso una reducción de las emisiones de CO ₂ de	24,8 millones de toneladas
Holanda	ahorró el consumo de energía primaria en	16,85 PJ
España	supuso una reducción de las emisiones de CO ₂ de	15 millones de toneladas
Estados Unidos	permitió una reducción del consumo de gas natural para generación eléctrica en 2006 del	5 %

Tecnología de conversión de la energía eólica en eléctrica

Una vez presentadas las grandes cifras de la generación eléctrica con energía eólica, en este capítulo se describen sus fundamentos técnicos. En una primera aproximación, desde el punto de vista energético, en un aerogenerador se produce una doble conversión. Por un lado, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica de rotación por medio de una aeroturbina, y, por otro lado, la energía mecánica se convierte en eléctrica mediante un generador eléctrico. La descripción que sigue se hará en el mismo orden que este sentido del flujo energético.

La energía del viento

El viento se debe a que el aire atmosférico se calienta y se enfría de forma desigual en las diferentes partes de la tierra, debido a la posición de las mismas respecto al Sol, que varía con ciclos diario y anual, y a otros factores, como el tipo y la altura de la superficie terrestre (incluido el mar) en cada zona, la diferente velocidad de calentamiento y enfriamiento de dicha superficie, o la nubosidad. El viento a gran escala (del orden de 1000 km) depende del equilibrio de las fuerzas de presión, de Coriolis (rotación terrestre) y de rozamiento con el suelo. A menor escala, cobra mayor importancia el relieve del suelo o la presencia del mar [5].

Por otra parte, el viento es variable en el tiempo, y sus fluctuaciones tienen una gran variabilidad de frecuencias. Para caracterizar el comportamiento de su velocidad media en un emplazamiento dado, se utilizan las funciones de distribución acumuladas, normalmente expresadas como el número de horas anuales que se supera una determinada velocidad. La figura 5 muestra la forma típica de una de estas curvas en su parte izquierda. Si se pretende caracterizar también la dirección del viento, se utiliza la denominada rosa de los vientos. La parte derecha de la figura 5 muestra un ejemplo de dicha gráfica [6], donde la longitud de los radios indica el porcentaje del tiempo en que el viento procede de esa dirección, y el número señala la velocidad media en m/s.

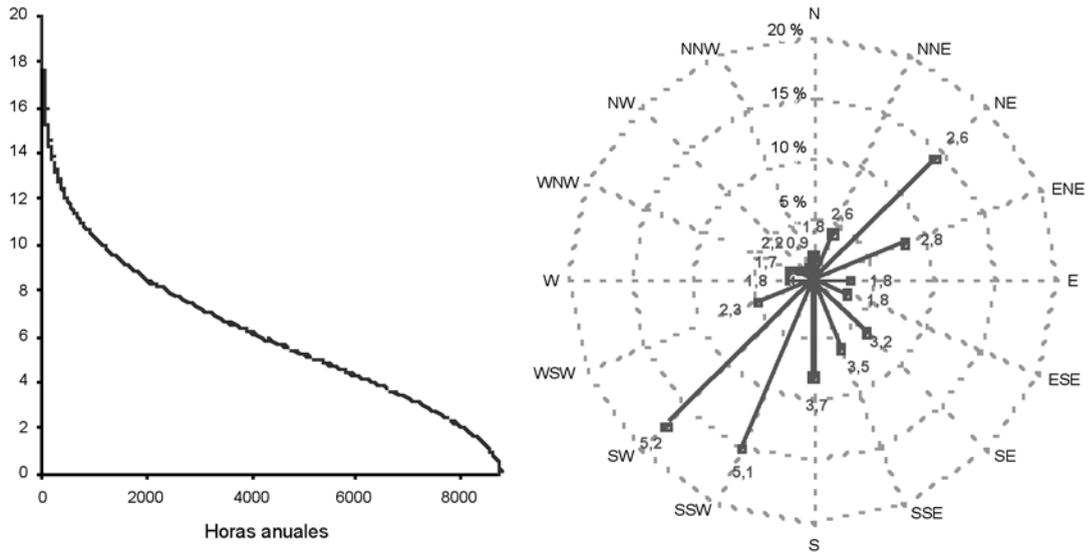


Figura 5. Curva de velocidades de viento acumuladas (izquierda) y rosa de los vientos (derecha)

La energía del viento es la asociada a su masa en movimiento, es decir, a su energía cinética. En un aerogenerador, la aeroturbina es la encargada de extraer parte de esa energía para convertirla en energía mecánica de rotación. Si se considera el tubo de corriente de aire que pasa a través de una turbina de diámetro D , la potencia desarrollada por el viento, P_v , a la velocidad V , es la energía asociada a la masa, m , de un volumen cilíndrico de aire de ese tubo cuyo espesor es el espacio recorrido por el aire en la unidad de tiempo (es decir, V), tal como se muestra esquemáticamente en la figura 6.

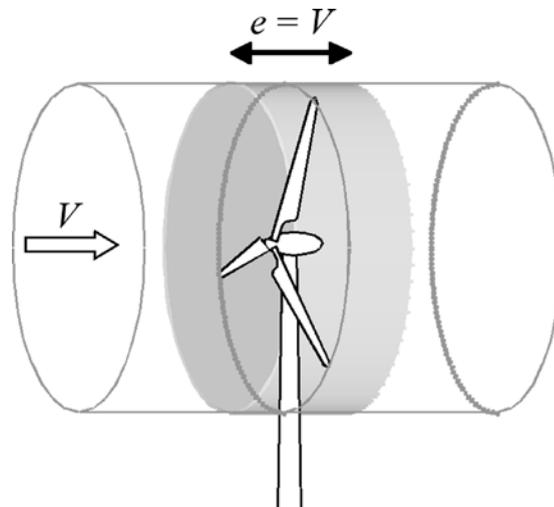


Figura 6. Volumen cilíndrico del aire que atraviesa una aeroturbina por unidad de tiempo.

Así, si ρ es la densidad del aire, la potencia del viento a través de la turbina es:

$$P_V = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{D^2}{4} V V^2 = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3$$

En esta expresión se puede observar que la potencia es proporcional al cuadrado del diámetro de la turbina o, lo que es equivalente, al área barrida por la misma. Así, una aeroturbina que duplique en tamaño a otra, cuadruplica su potencia. También se puede ver que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que significa que, si el viento que circula por una turbina duplica su velocidad, la potencia desarrollada es ocho veces mayor.

Puesto que la energía cinética de una masa de aire es proporcional al cuadrado de su velocidad, la aeroturbina provoca un frenado del viento que la atraviesa, por lo que el tubo de aire descrito anteriormente no es completamente cilíndrico sino que sufre una deformación, tal como ilustra esquemáticamente la figura 7.

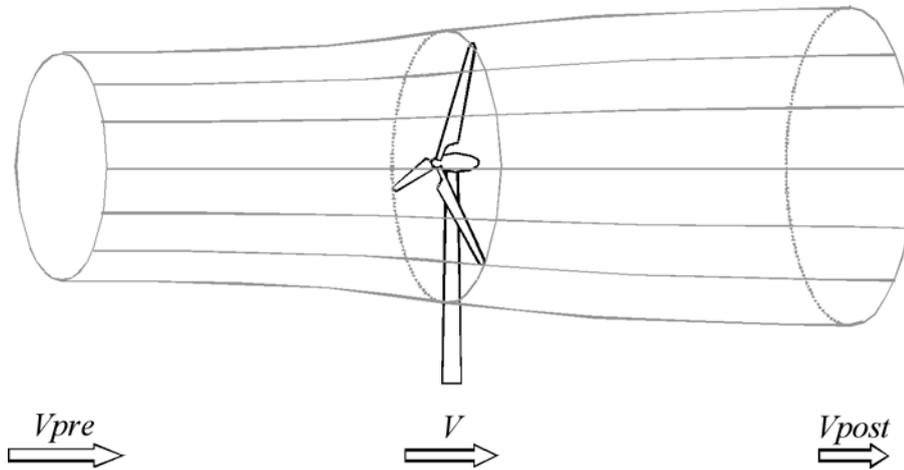


Figura 7. Esquema tridimensional del tubo de corriente por la turbina (arriba) y perfil de velocidades del viento (abajo).

Por supuesto, resulta imposible extraer toda la energía cinética del viento, puesto que ello supondría que la velocidad del mismo detrás de la turbina sería nula. Así, la potencia mecánica disponible en el eje de la aeroturbina, P , es solamente una fracción de la potencia del viento determinada anteriormente, P_V . El cociente entre ambas es el llamado coeficiente de potencia, C_p , por lo que la potencia extraíble del viento se puede expresar como:

$$P = C_p P_V = \frac{1}{8} C_p \rho \pi D^2 V^3$$

Se puede determinar teóricamente el máximo valor alcanzable por el coeficiente de potencia, el conocido como límite de Betz, 0,59, aunque en la práctica raramente supera el valor de 0,5. Para una turbina dada orientada en la dirección del viento, este coeficiente depende de dos parámetros: la velocidad específica, λ , definida como el cociente entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento; y el ángulo de paso de pala, β . A modo de ejemplo, la figura 8 muestra la familia de curvas de C_p en función de λ y β y de un aerogenerador comercial. En ella, se puede observar un aspecto interesante desde el punto de vista del control de la potencia del aerogenerador, la disminución del coeficiente de potencia

al aumentar el ángulo de paso de pala. La variación del paso de pala es un mecanismo de limitación de la potencia utilizado en la mayoría de los aerogeneradores actuales.

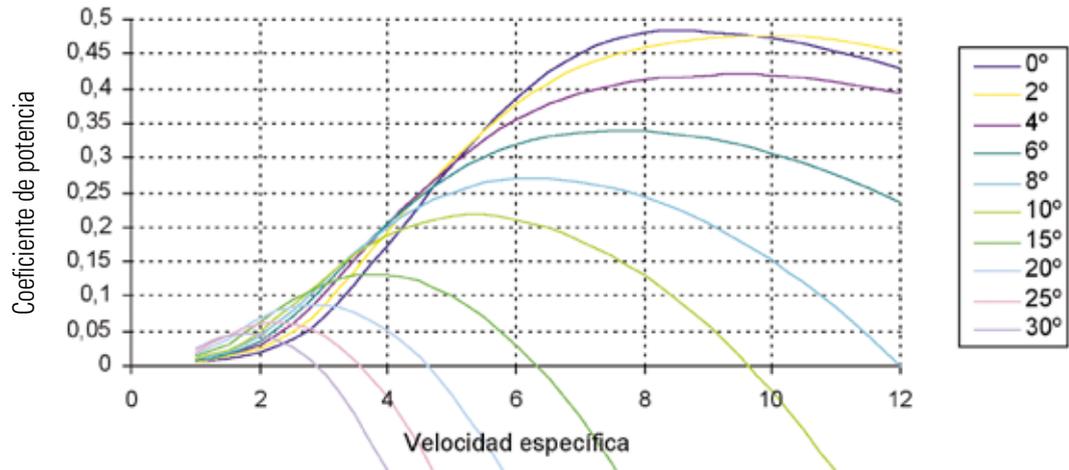


Figura 8. Curvas $C_p(\lambda, \beta)$ de un aerogenerador comercial de tres palas.

Elementos constituyentes de un aerogenerador

Tal como se ha indicado anteriormente, la aeroturbina extrae parte de la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica de rotación en su eje. La subsiguiente transformación en energía eléctrica se lleva a cabo por medio de un generador eléctrico rotativo. Aparte de estos elementos básicos desde el punto de la conversión energética, turbina y generador, un aerogenerador está compuesto por muchos otros elementos constitutivos, necesarios para llevar a cabo de forma adecuada su función. La figura 9 los muestra de forma esquemática.

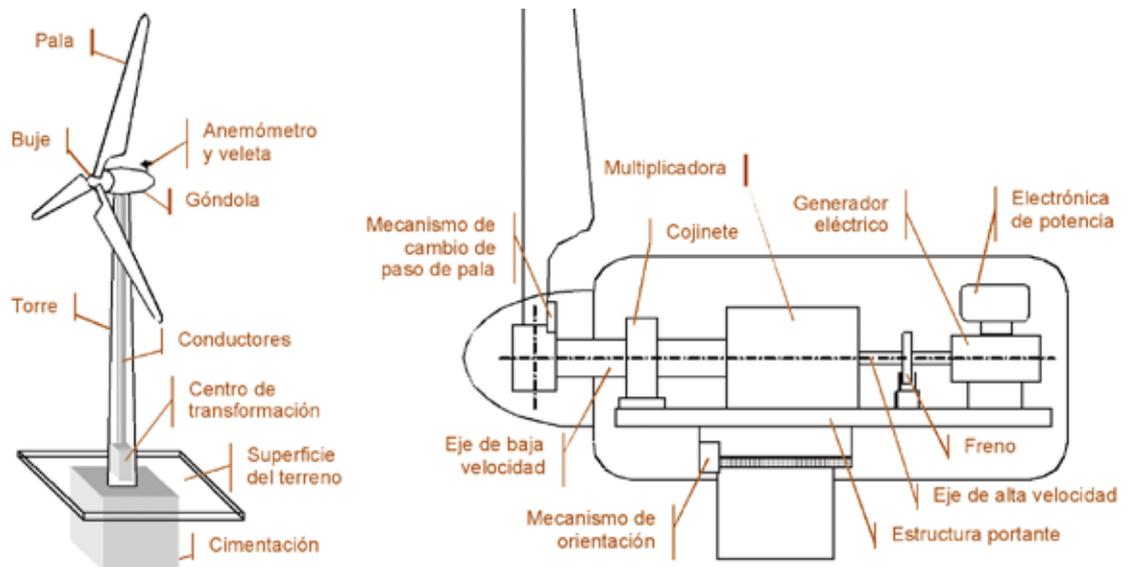


Figura 9. Esquema de los elementos constituyentes de un aerogenerador tripala: aspecto general (izquierda) y detalle del interior de la góndola (derecha).

De todos ellos, nos detendremos solamente en los más importantes desde el punto de vista de la caracterización del comportamiento del aerogenerador: la aeroturbina, el sistema de transmisión, el generador eléctrico y la electrónica de potencia.

Aeroturbina

Las aeroturbinas pueden ser de eje vertical, como la Savonius o la Darrieus, o de eje horizontal, como la multipala americana o la tipo hélice (de una, dos, tres o más palas), orientadas a barlovento o a sotavento. En la figura 10 se representan esquemáticamente los distintos tipos, así como la forma típica de sus correspondientes curvas de coeficiente de potencia, C_p , en función de la velocidad específica, λ , prescindiendo de la dependencia del ángulo de paso. Nótese que el óptimo en la conversión de energía se tiene con velocidades más elevadas cuanto menor es el número de palas.

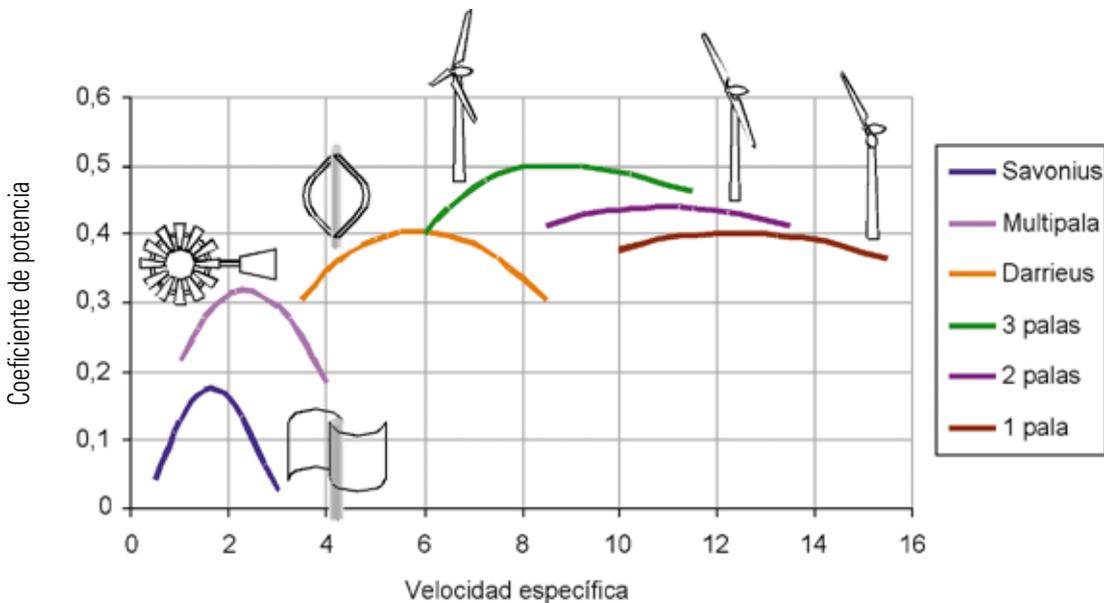


Figura 10. Distintos tipos de aeroturbina y sus coeficientes de potencia, $C_p(\lambda)$.

Sistema de transmisión

El sistema de transmisión está formado por los elementos que permiten la transmisión de la energía mecánica de rotación desde la aeroturbina hasta el generador eléctrico. En la mayoría de aerogeneradores está compuesto fundamentalmente por: el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad. La necesidad de una multiplicadora tiene su origen en que, en muchos casos, las velocidades de giro adecuadas para la turbina y para el generador son diferentes. Se trata de un elemento pesado y propenso a averías, puesto que sufre fuertes picos de par provenientes de la turbina, así como fatiga, debidos a la variabilidad y turbulencia del viento. Aunque existen diseños que permiten su eliminación, utilizando generadores eléctricos multipolares, la tendencia actual es mantenerla, disminuyendo su relación de transmisión para atenuar los mencionados problemas.

Generador eléctrico y electrónica de potencia

El generador eléctrico, junto con los convertidores electrónicos de potencia asociados, es el elemento que permite la conversión de la energía cinética de rotación, transmitida desde la turbina, en energía eléctrica que se puede inyectar a la red eléctrica a la que está conectado el parque eólico. Existen varios tipos de generador eléctrico que se han probado en generación eólica. De entre todos ellos, los más importantes desde el punto de vista de la explotación comercial son: el generador asíncrono (de jaula de ardilla o de rotor bobinado) y el generador síncrono (de imanes permanentes o con devanado de excitación) [7].

Desde el punto de vista del comportamiento de los aerogeneradores como elementos de un sistema de energía eléctrica, lo que tiene importancia es la configuración del generador eléctrico y su electrónica de potencia asociada. Así, los aerogeneradores más utilizados actualmente para generación eléctrica se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, caracterizados por su velocidad de giro [8]:

- Velocidad fija
- Velocidad ligeramente variable
- Velocidad variable, doblemente alimentado
- Velocidad variable, con convertidor pleno

Aerogeneradores de velocidad fija

Son máquinas dotadas de un generador asíncrono de jaula de ardilla directamente acoplado a la red por medio de un simple convertidor del tipo arrancador suave. Su velocidad de giro es fija, muy próxima a la de sincronismo, que, a su vez, viene determinada por la frecuencia de la red eléctrica y el número de pares de polos del generador. Pueden incorporar sistemas de compensación de potencia reactiva. La figura 11 ilustra las topologías más comunes.

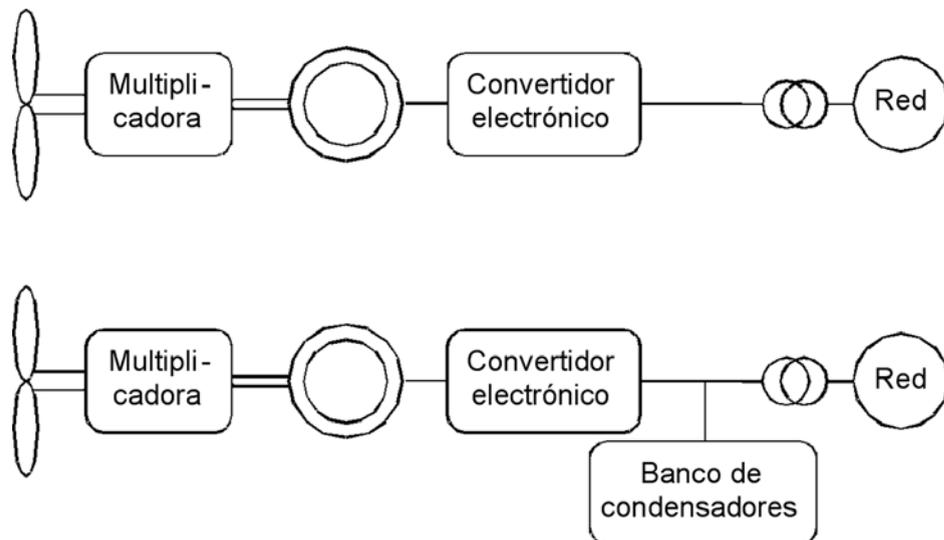


Figura 11. Aerogeneradores de velocidad fija.

Son aerogeneradores sencillos, robustos y de bajo coste, pero el rendimiento en la conversión aerodinámica está limitado por la imposibilidad de modificar su velocidad de giro para adaptarse a los distintos regímenes de viento. Su comportamiento ante perturbaciones de la red eléctrica es problemático, análogo al de un motor asíncrono. Se trata de la tecnología que más se implantó en los primeros parques eólicos.

Aerogeneradores de velocidad ligeramente variable

Estos aerogeneradores llevan de un generador asíncrono de rotor bobinado directamente acoplado a la red. Mediante un convertidor electrónico simple se puede regular el valor efectivo de la resistencia del devanado retórico, lo que permite un pequeño margen de variación de velocidad, del orden de hasta un 10 % por encima de la velocidad de sincronismo. Su configuración se representa de forma esquemática en la figura 12.

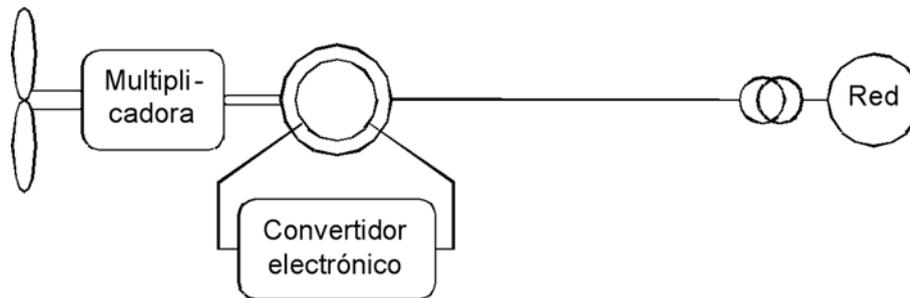


Figura 12. Aerogeneradores de velocidad ligeramente variable.

Son aerogeneradores algo más costosos, pero con mejor rendimiento en la conversión aerodinámica, dada su posibilidad de variación de velocidad de giro. Su comportamiento ante perturbaciones de la red eléctrica es igualmente problemático, aunque algo mejor que los anteriores debido a la capacidad de control sobre el deslizamiento que da el convertidor.

Aerogeneradores de velocidad variable con generador doblemente alimentado

Como en el caso anterior, el generador eléctrico de estas máquinas es asíncrono de rotor bobinado. La diferencia está en que este bobinado está alimentado mediante convertidor doble (CA/CC y CC/CA) de potencia reducida (del orden del 30 % de la potencia asignada del aerogenerador), tal como se muestra en la figura 13.

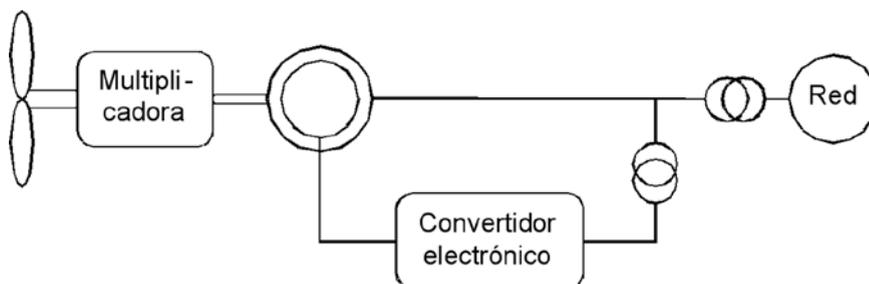


Figura 13. Aerogeneradores de velocidad variable, doblemente alimentados.

Este convertidor alimenta el rotor con corriente alterna de baja frecuencia, en relación con la frecuencia síncrona en el circuito del estator, que permite velocidades de giro variables a la máquina en un amplio margen (típicamente, desde un 40 % por debajo de la velocidad de sincronismo hasta un 30 % por encima). Dependiendo de la velocidad de la máquina, la potencia mecánica de la turbina se inyecta a la red eléctrica repartida por el circuito estático y por el rotórico. Presentan gran eficiencia energética con un sistema de convertidores de menor potencia que la nominal de la máquina. Su comportamiento frente a perturbaciones de red se mejora con la inclusión de equipos adicionales y con un control adecuado sobre el convertidor.

Aerogeneradores de velocidad variable con convertidor de potencia plena

A diferencia de los anteriores, estos aerogeneradores incorporan un generador eléctrico síncrono, desacoplado de la frecuencia de la red por medio de un convertidor doble por el que circula la totalidad de la potencia generada. La figura 14 muestra las tres topologías más comunes: generador de imanes permanentes con eliminación de la multiplicadora, generador convencional con devanado de excitación y multiplicadora, y generador con devanado de excitación multipolar para eliminar la multiplicadora. Nótese el pequeño convertidor adicional necesario cuando hay devanado excitador.

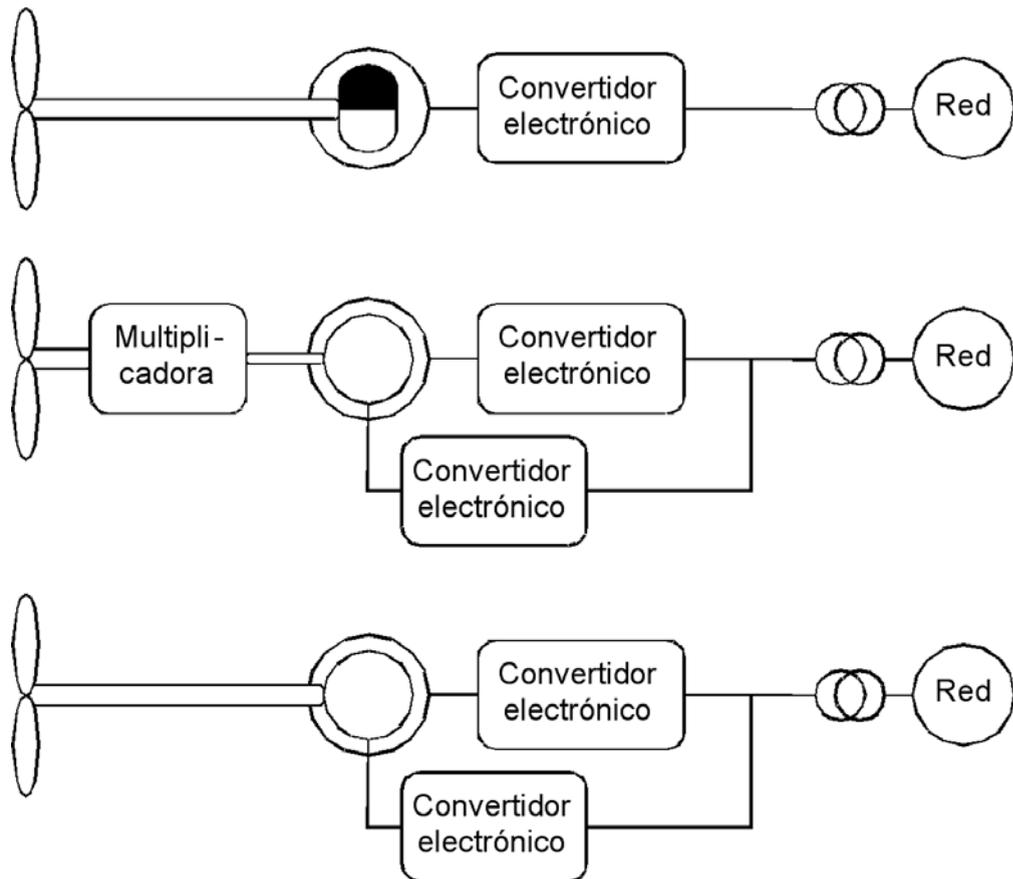


Figura 14. Aerogeneradores de velocidad variable, con convertidor de potencia plena.

El convertidor de plena potencia aísla, en frecuencia, el sistema de velocidad variable viento-aero-generador del sistema síncrono de red, lo que permite un gran margen de velocidad de giro para un mejor aprovechamiento energético. Con esta configuración la posibilidad de control de potencia es prácticamente total y con la rapidez propia de los sistemas de control electrónico. Estos generadores no consumen potencia reactiva de la red para magnetizarse y pueden participar en el control de tensión de la red aportando o consumiendo potencia reactiva dentro del margen de la corriente nominal del convertidor. Su comportamiento frente a perturbaciones de red es excelente con el adecuado control sobre el convertidor.

Integración de la generación eólica a gran escala en los sistemas eléctricos

Por supuesto, como ocurre con cualquier otra fuente energética, el uso de la energía eólica no está exento de dificultades técnicas, que se manifiestan más claramente cuando el nivel de penetración en un sistema eléctrico aumenta. Su utilización a gran escala plantea una serie de retos relacionados con los siguientes aspectos claves [9], que simplemente enumeraremos:

- Efecto sobre la variabilidad de la demanda neta (demanda menos generación eólica)
- Efecto sobre la previsión de la reserva de generación necesaria
- Efecto sobre la confiabilidad del sistema
- Efecto de la variabilidad de la generación eólica sobre los costes de operación
- Efecto sobre el reconocimiento de potencia instalada
- Impacto de la previsión de viento
- Variación de los efectos con el nivel de penetración
- Incorporación de la experiencia actual sobre la operación del sistema

La preocupación de por estos aspectos ha llevado a los operadores de los sistemas eléctricos a la elaboración de múltiples estudios, a los que se suma un constante esfuerzo investigador en todo el mundo para afrontar los retos planteados [1]. Por ejemplo, en el caso de España, es particularmente interesante el documento elaborado por Red Eléctrica de España y Rede Eléctrica Nacional (Portugal) [10] sobre la generación eólica técnicamente admisible en el sistema peninsular ibérico.

Conclusiones

Se ha presentado una panorámica general sobre el aprovechamiento de la energía del viento para la generación de electricidad. Esta fuente de energía destaca por su carácter renovable y, particularmente, por su carencia de emisiones de gases de efecto invernadero. Se ha mostrado su grado de madurez y de implantación actuales, demostrando que constituye una importante opción energética en la lucha contra el cambio climático

Referencias

International Energy Agency, "2005 IEA Wind Energy Annual Report", IEA R&D Wind, 2006. Disponible en www.ieawind.org.

The Windicator, Windpower Monthly News Magazine, Enero 2007. Disponible en www.windpower-monthly.com.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE, "Evolución de la potencia eólica instalada en España hasta 2006. Adecuación al P.O. 12.3", Informe interno, Madrid, 2007.

Red Eléctrica de España, "El sistema eléctrico español. Avance del informe 2006", Madrid, 2006. Disponible en www.ree.es.

J.L. Rodríguez, J.C. Burgos, S. Arnalte, "Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica", Madrid: Editorial Rueda, 2003.

D.A. Spera, "Wind turbine technology", ASME Press, 1994.

J. Fraile, "Máquinas eléctricas", 4ª ed. corregida. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2002.

L.H. Hansen et al., "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, Dic. 2001.

E.A. DeMeo, W. Grant, M.R. Milligan, M.J. Schuerger, "Wind plant integration", IEEE Power and Energy Magazine, pp. 38-46, Nov.-Dic. 2005.

REE, REN, "Producción eólica técnicamente admisible en el sistema eléctrico peninsular ibérico. Horizonte 2011", Julio 2006.

CAPÍTULO 11

ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA CLIMATIZACIÓN

Javier F. Urchueguía Schölzel

*Catedrático de Física Aplicada y Socio Fundador de Energesis Ingeniería.
Universidad Politécnica de Valencia.*

Introducción

El consumo energético en el sector de la edificación se ha incrementado considerablemente en los últimos años; con el objetivo de frenar esta tendencia, el nuevo Código Técnico de la Edificación contempla los aspectos energéticos como parte fundamental del diseño del edificio. Además, el R.D. 47/2007, que en breve entrará en vigor, implanta la calificación energética de edificios, por lo que el proyectista necesita de herramientas y sistemas que incrementen la eficiencia energética de sus diseños.

La climatización mediante bombas de calor geotérmicas es un sistema muy extendido en países del Norte de Europa, [1], y Estados Unidos, basado en intercambiar calor con el suelo mediante un circuito de tuberías por las que circula agua. La mayor eficiencia del sistema radica en el foco con el que se intercambia calor. Generalmente, el medio más empleado como foco es el aire pero no el más eficiente, debido a la oscilación de su temperatura a lo largo del año. El agua, por otro lado, es un foco más estable en cuanto a temperaturas, por lo que el intercambio producido es más eficiente; sin embargo, presenta otros problemas asociados al sistema de intercambio (torres de refrigeración) como la legionelosis. El intercambio con el suelo es mucho más ventajoso, ya que la temperatura de la tierra es estable a lo largo del año, debido a la capacidad que tiene la tierra para acumular el calor procedente del sol, y el intercambio se produce mediante un sistema cerrado sin contacto exterior.

Esta fuente de energía, denominada energía geotérmica de baja entalpía, está considerada como una fuente de energía renovable (Libro Blanco de la Comisión Europea Energía para el Futuro, Fuentes de Energía Renovables COM(97)599 final, ver también [2]) ya que aprovecha la energía del sol captada por la tierra.

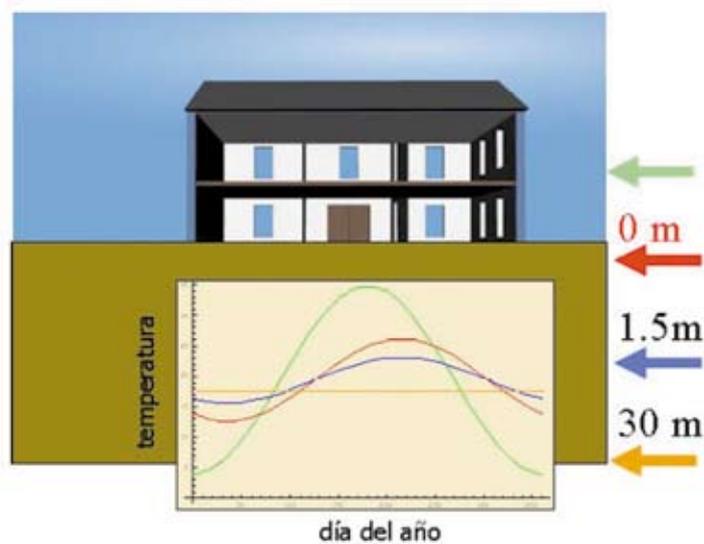


Figura 1.- Evolución de la temperatura a lo largo del año a distintas profundidades en la ciudad de Valencia.

Fundamentos de la bomba de calor geotérmica

Una bomba de calor geotérmica es un sistema que cede y absorbe calor del terreno a través de un conjunto enterrado de tuberías plásticas de alta densidad. Está formada por:

Intercambiador de calor enterrado

Para extraer el calor del suelo o disiparlo en este, se utiliza un sistema de tuberías plásticas (polietileno, polipropileno...) que se entierran en el subsuelo. Por su interior circula el fluido caloportador que bien puede ser agua o una solución acuosa con anticongelante.

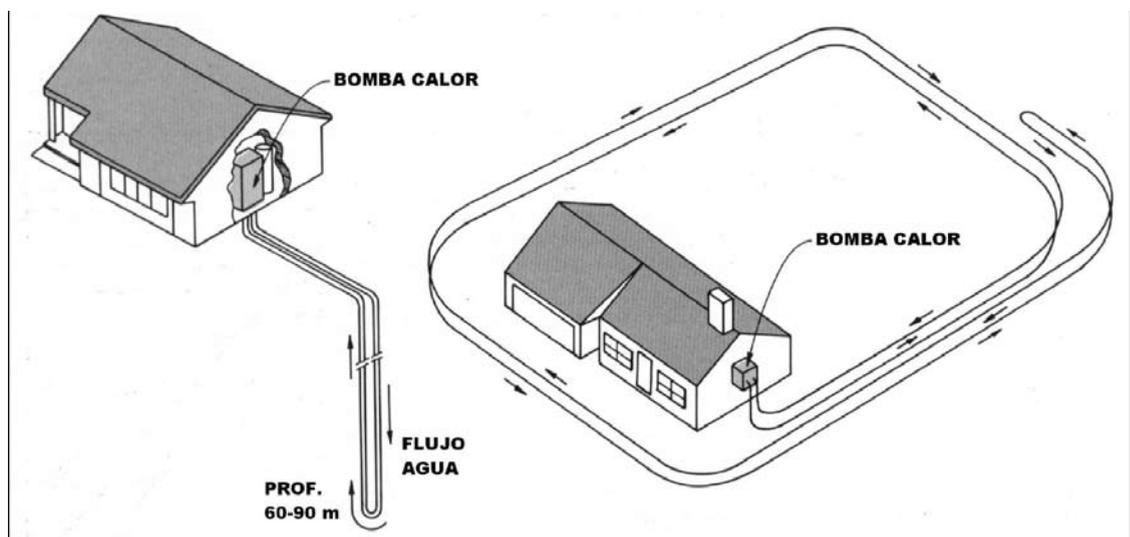


Figura 2 Intercambiadores enterrados: configuración vertical y horizontal

Este sistema de tuberías puede instalarse siguiendo distintas configuraciones, cuya elección depende de las necesidades térmicas y de la superficie de terreno disponible:

- Configuración horizontal: la tubería se entierra en zanjas a poca profundidad, por lo que se requiere una gran extensión de terreno.
- Configuración vertical: la tubería se introduce en pozos verticales de pequeño diámetro (aproximadamente 160 mm.) y profundidades entre 50 y 100 m.
- Configuración slinky: es una variante de la configuración horizontal consistente en enterrar la tubería en forma de espiral con el objeto de conseguir la mayor longitud de intercambio posible.

Bomba de calor geotérmica

En general, una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Por tanto, la ventaja que poseen las bombas de calor frente a otros sistemas, reside en su capacidad para aprovechar la energía existente en el ambiente (foco frío), tanto en el aire como en el agua o la tierra, y que le permite calefactar las dependencias interiores (foco caliente) con una aportación relativamente pequeña de energía eléctrica. Cuando se realiza la transferencia de calor en sentido inverso, es decir, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración.

La bomba de calor geotérmica extrae energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior, mientras que en verano extrae el calor del interior y lo devuelve al subsuelo.

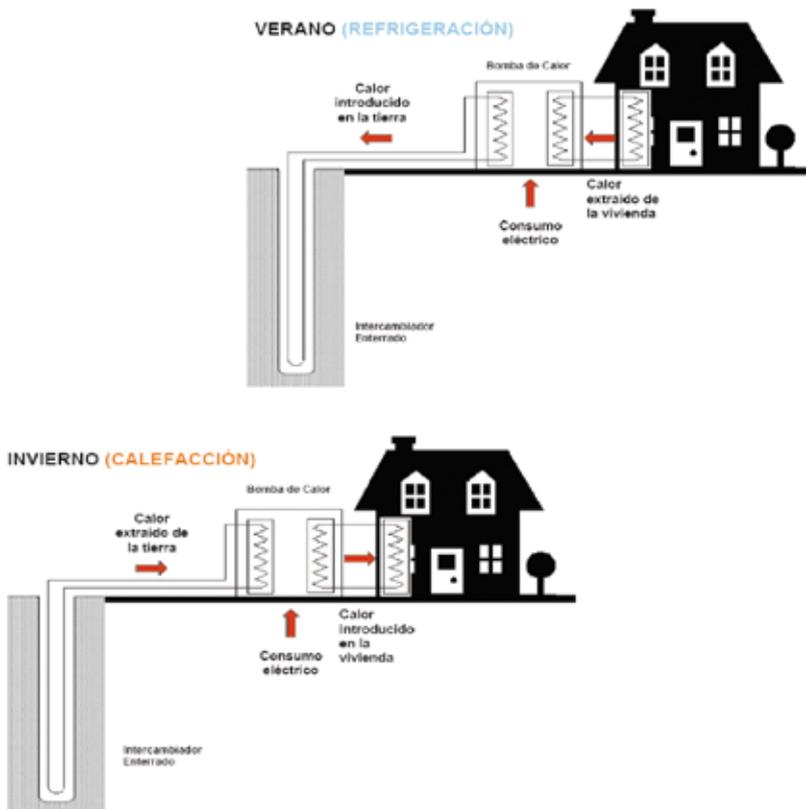


Figura 3 Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica

Tanto la potencia calorífica o frigorífica de la bomba de calor como la eficiencia energética (COP, Coefficient of Performance, razón de la potencia calorífica o frigorífica suministrada por la bomba de calor y su consumo eléctrico) pueden variar según la temperatura de trabajo, independiente de las eficiencias mecánicas y térmicas de los distintos componentes de la máquina.

En la figura 4 vemos la base física de la relación temperatura-prestaciones para una bomba de calor trabajando en modo calor. En la gráfica a la izquierda se ve el aumento de entalpía del refrigerante en la etapa de compresión [1 – 2], que corresponde al trabajo del compresor. Si logramos aumentar la temperatura de evaporación, y por lo tanto la presión (gráfica a la derecha), el compresor tiene que trabajar menos para llegar a la misma presión (y por lo tanto temperatura) en el condensador y el gasto de electricidad disminuye. En refrigeración se puede ahorrar energía del mismo modo bajando la temperatura del condensador. El suelo, comparado con el aire, ofrece una fuente de calor a mayor temperatura en invierno, cuando esté conectado al evaporador; en verano, cuando intercambia calor con el condensador, forma un sumidero de calor a menor temperatura.

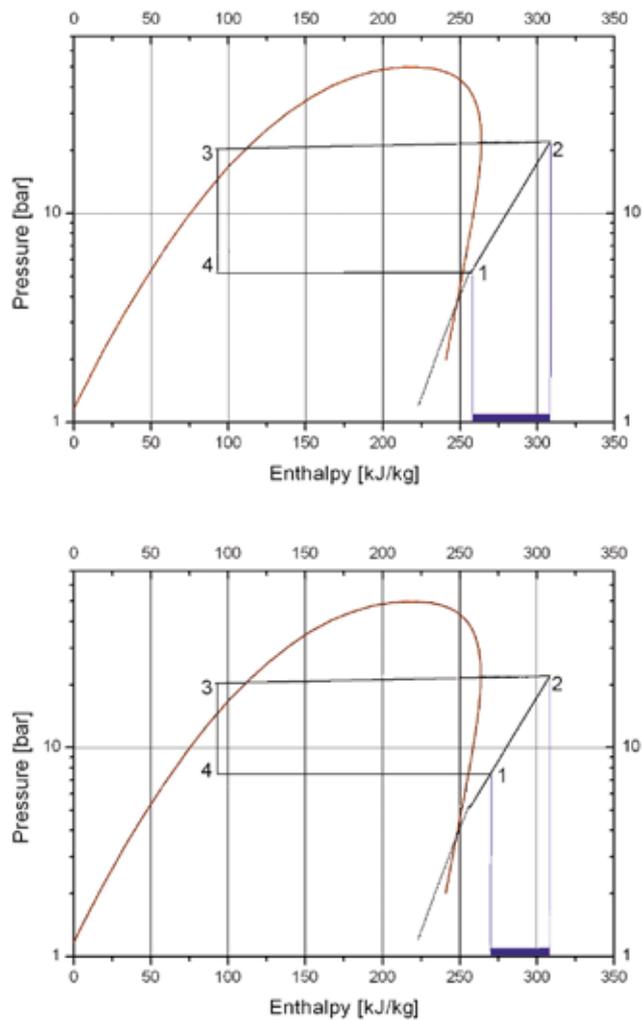


Figura 4 Ciclo frigorífico de la bomba de calor

Ventajas respecto a otros sistemas

Ahorro energético

El funcionamiento de una instalación de bomba de calor geotérmica se basa en el aprovechamiento del terreno como foco de intercambio de calor con una bomba de calor. Ocurre que el terreno tiene temperaturas más estables y más moderadas que el aire, que es el foco de intercambio de calor en sistemas de bombas de calor convencionales. En invierno, el terreno está más caliente que el aire por lo que se incrementa la eficiencia de la bomba de calor. En verano ocurre algo similar: se está cediendo calor al exterior, y como el terreno está más frío que el aire admite mejor esta cantidad de calor, por lo que se aumenta la eficiencia de la bomba de calor. Esta es la justificación de la mejora en la eficiencia energética de una bomba de calor geotérmica.

El éxito de estos sistemas radica en que por cada kW de energía eléctrica consumida podemos generar, aproximadamente, 4.5 kW de refrigeración ó 4 kW de calefacción, mientras que en los sistemas convencionales de climatización por cada kW de potencia eléctrica se generan aproximadamente 2 kW de refrigeración ó 2.3 kW de calefacción.

Puede afirmarse, por lo tanto, que este sistema de climatización produce ahorros del orden de un 50% en la factura eléctrica.

Disminución de ruido

Con la alternativa geotérmica se eliminan fuentes de ruido como las asociadas a las unidades exteriores convencionales de climatización. De esta manera, la opción geotérmica reduce la contaminación acústica del medio.

Impacto estético agradable

Se reduce considerablemente el impacto visual asociado a las unidades de techo/fachada que aparecen en los sistemas convencionales, ya que la tubería está totalmente enterrada bajo la capa vegetal existente en la zona.

Bioseguridad

Este tipo de instalaciones no requiere torres de refrigeración para su funcionamiento. De esta manera se eliminan los problemas asociados a ellas, tales como el riesgo de legionela.

Durabilidad. Bajo coste de mantenimiento y de explotación

La vida útil de este tipo de instalaciones oscila entre los 25 y los 50 años. Esta vida útil es mucho mayor que la de una instalación convencional de climatización con bomba de calor aire-agua, que tiene como vida media 15 años.

Disminución en las emisiones de CO₂

Como consecuencia del ahorro energético derivado de los menores consumos eléctricos, las emisiones de CO₂ en estas instalaciones se reducen en más de un 50%. Su importancia en el marco del Protocolo de Kyoto es manifiesta.

Proyecto Geocool

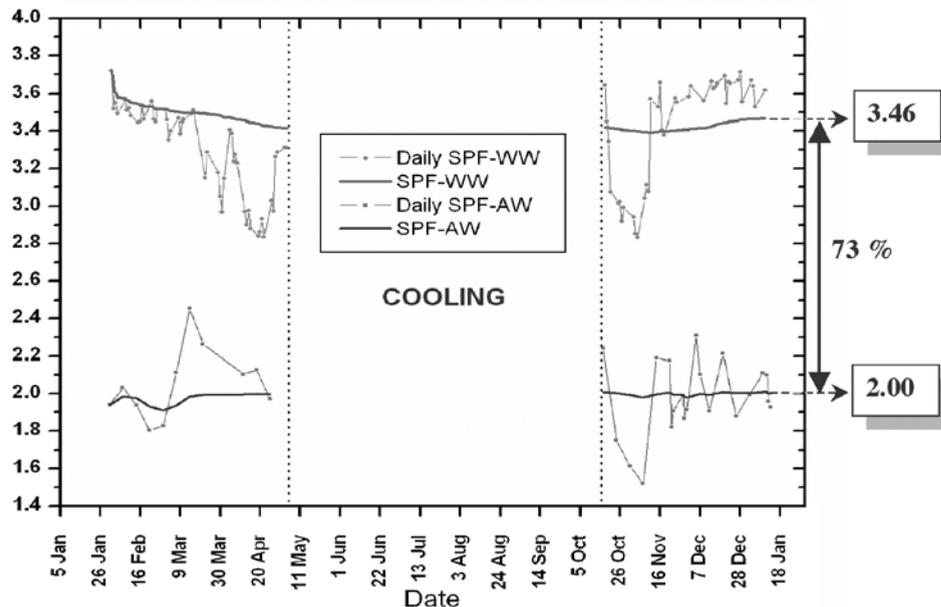
El proyecto Geocool, [3], enmarcado dentro del Quinto Programa Marco para la investigación y el desarrollo tecnológico en Europa, ha desarrollado un sistema de climatización geotérmica con bomba de calor aplicable a las zonas costeras mediterráneas. Tradicionalmente, las instalaciones de climatización con bombas de calor geotérmicas han sido siempre instalaciones de calefacción y han tenido éxito únicamente en países de climatología fría como Suecia, Alemania, Francia o Austria donde es poco rentable o no es posible utilizar bombas de calor aire-aire para calefacción debido a la temperatura extremadamente fría del aire exterior.

Con este proyecto de investigación se pretendía comprobar la capacidad de funcionamiento de las instalaciones de climatización geotérmicas con bomba de calor en funciones de frío y comparar su rendimiento con una instalación convencional de climatización, así como abordar la problemática del diseño de instalaciones de ese tipo.

En concreto, el proyecto ha consistido en la modelización y construcción de una instalación prototipo de climatización geotérmica para su comparación con un sistema convencional de climatización con bomba de calor aire-aire. La instalación se construyó en un ala de oficinas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), y el diseño del proyecto, el experimento y la instalación, corrieron a cargo de un equipo multidisciplinar de científicos de la universidad que recibieron la colaboración de empresas y universidades de otros países.

En la misma instalación se incluyen los dos sistemas, el geotérmico y el convencional, que funcionan alternativamente para, con un complejo sistema de sensores con el que se han estado tomando los datos necesarios sobre el funcionamiento de los sistemas y las condiciones climatológicas, poder comparar los resultados.

Como resultados más destacables de la investigación, ver [4], se pueden señalar la constatación de los ahorros energéticos que genera el sistema geotérmico, que en promedio se sitúan alrededor del 50% de la energía requerida por el sistema convencional, la seguridad y fiabilidad del sistema además de otras ventajas y la recopilación de una serie de conocimientos y experiencias en la problemática del diseño de estas instalaciones.



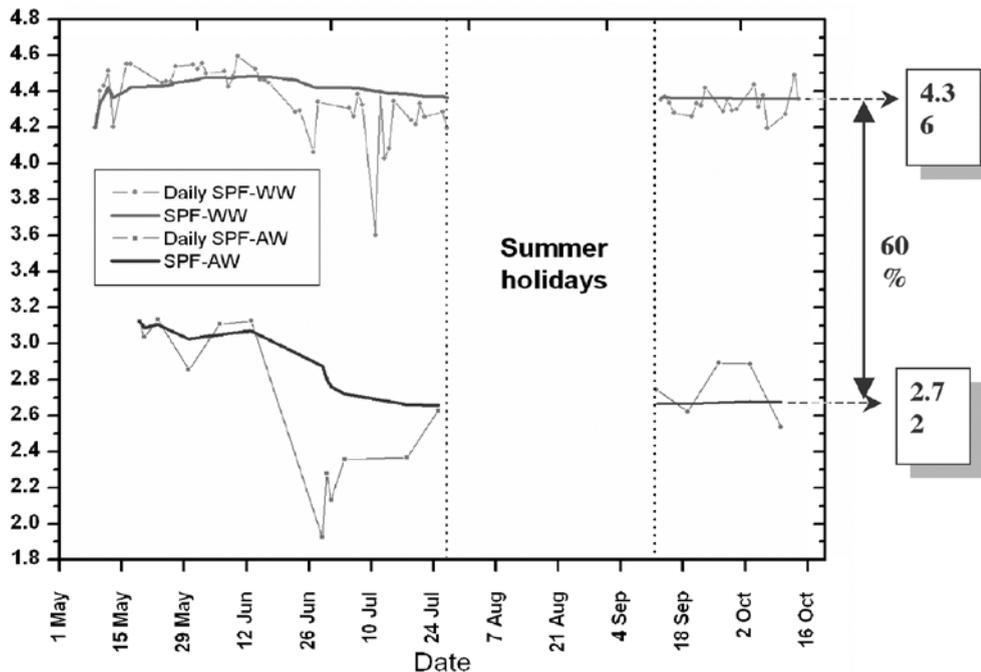


Figura 5.- Comparativa del rendimiento estacional de la instalación bomba aire-agua (AW), agua-agua (WW) [1]

Aplicaciones innovadoras de la climatización geotérmica

Instalación geotérmica híbrida

Generalmente, en los edificios del sector terciario en las zonas de clima mediterráneo, la demanda energética de climatización en refrigeración es mucho mayor que la de calefacción, por dicho motivo las bombas de calor cederán más calor al terreno (condensación) que el que absorban en calefacción (evaporación), este funcionamiento de las bombas de calor produce un aumento progresivo de la temperatura del terreno, produciéndose un descenso progresivo de la eficiencia (COP) de las bombas de calor. Para evitar este problema se plantea un diseño innovador consistente en una instalación geotérmica apoyada por un aerocondensador, denominada instalación geotérmica híbrida.

El uso de este tipo de instalaciones híbridas permite:

- Regenerar el terreno. Cuando en épocas de refrigeración aumenta la temperatura del terreno se puede evacuar el calor al ambiente mediante el aerocondensador. De esta misma manera también se puede preparar el terreno para la época estival disminuyendo su temperatura.
- Utilizar en todo momento el foco de calor más eficiente. En épocas de primavera-otoño donde se puede tener demanda de refrigeración es posible que sea más eficiente trabajar contra el ambiente que contra el terreno.
- Reducir considerablemente el tamaño del intercambiador geotérmico puesto que el dimensionamiento del intercambiador se realiza para la potencia de refrigeración nominal del edificio, no para la

potencia pico. De esta manera en los momentos en donde por simultaneidad u otros factores tengamos una potencia por encima de la nominal se pondrán en funcionamiento ambos sistemas (intercambiador y aerococondensador) para condensar las bombas de calor.

➤ Reducir considerablemente el coste del intercambiador y el tiempo de amortización de la instalación debido a la reducción de los metros de perforación.

➤ Mejorar la eficiencia de la instalación. Desarrollando un sistema de control adecuado se puede llegar a ahorrar más de un 30 % respecto a un sistema convencional.

Este sistema de climatización ha sido la solución tecnológica planteada dentro del programa GESTA 2006 (Gestión de Soluciones de Tecnología Avanzada) para reducir el gasto energético en sistemas de climatización.

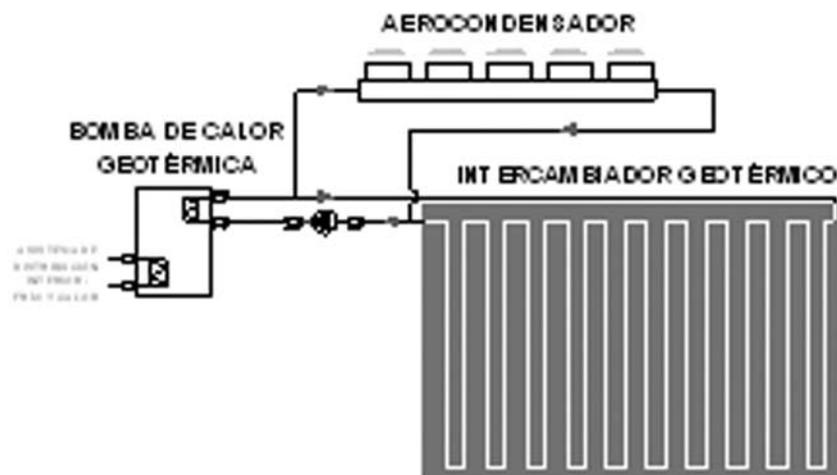


Figura 6.- Esquema de una instalación híbrida

Sistema geotérmico para evitar la congelación del terreno en naves de congelados

El desarrollo de una aplicación particular de un intercambiador geotérmico horizontal se ha realizado para una importante cadena de supermercados española. El sistema consiste en calentar el subsuelo de una nave de congelados aprovechando el calor residual de la generación de frío.

Generalmente, las temperaturas en las naves de almacenamiento de productos congelados son, normalmente, inferiores a -20°C , por lo que en régimen estacionario, las temperaturas que se alcanzan en el subsuelo de la nave industrial están por debajo de 0°C , produciéndose la congelación del agua que éste contiene. La congelación de la humedad del suelo provoca un aumento de volumen de ésta, con el consiguiente levantamiento de la solera de hormigón de la nave, efecto conocido como "frost heave". Convencionalmente, para evitar esto, se introducen debajo de la solera de hormigón, y de las capas de aislante térmico e impermeabilizante, unas resistencias eléctricas embebidas en una presolera de hormigón, para

mantenerla a una temperatura constante y evitar la transferencia térmica de la nave al suelo. Esto genera un elevado consumo de energía ya que se está generando calor por efecto joule. Sin embargo, empleando el sistema diseñado en este proyecto se reduce prácticamente en su totalidad el consumo de energía eléctrica, incrementado notablemente la eficiencia energética de la instalación.

Determinación de la conductividad térmica de estructuras y subsuelos

Dentro del programa GESTA 2006 se ha desarrollado un "kit" compacto y transportable para la realización de medidas y análisis de datos que determinen de modo sencillo y rápido (tiempo real) la conductividad térmica efectiva del subsuelo y otras estructuras (Test in Situ).

Este laboratorio desarrollado forma parte de un grupo reducido de equipos a nivel mundial, ver referencias [5] y [6], y permite, entre otras ventajas, proporcionar información muy fiable para el diseño de sistemas geotérmicos, con un óptimo ajuste de la longitud de los intercambiadores y por consiguiente del precio de los proyectos. Para la determinación de las características térmicas del suelo, se fuerzan pulsos de inyección de calor o pulsos de extracción de calor en un bucle enterrado y se mide su respuesta en temperatura, esto es un factor novedoso, ya que actualmente sólo se podían realizar estudios mediante pulsos de inyección de calor. Este proceso nos ofrece un método experimental para obtener las características térmicas del suelo y nos ofrece una alternativa al cálculo de estas características mediante los métodos tradicionales de descripciones geológicas del suelo, sujetos siempre a grandes incertidumbres.

La gestión del dispositivo se realiza con una aplicación informática que recibe los datos vía GSM. Con esta aplicación se puede seguir los detalles de cualquier experimento de medida de conductividad térmica de manera remota.



Figura 7. - Laboratorio móvil para la caracterización térmica del suelo

Referencias

Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D. & Rybach, L.. *Current status of ground source heat pumps and underground thermal storage in Europe*. *Geothermics* 32 (4-6): 579-588. (2003)

Commission Staff Working Document: *The share of renewable energy in the EU, Country Profiles. Overview of Renewable Energy Sources in the Enlarged European Union.* (Brussels, 26.5.2004 SEC(2004) 547)

Urchueguía, J.F. (as coordinator in behalf of the Scientific Committee of the GeoCool project), et al. *Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along European Coastal Areas. Final Report.*

Urchueguía, J.F., Zacarés, M., Corberán J.M., Montero, Á., Martos, J. and Witte, H. *Comparative energy performance between a geothermal heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast.* Enviada a Energy, Conversion & Management. (Septiembre de 2006)

Gehlin, S., Thermal Response Test: Method development and evaluation. Doctoral thesis. Lulea University of Technology, Sweden (2002).

Witte, H.J.L., Kalma, S., van Gelder, A.J., *In-situ thermal conductivity testing: The dutch perspective* (part 1 and 2). The Source, Volume 13, No. 3 and The Source, Volume 13, No. 4. (2000).

CAPÍTULO 12

Biodiésel

José Antonio Moreno Delgado

Secretario General Técnico de Abengoa

El Biodiésel

Se denomina Biodiésel al combustible renovable compuesto por ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos que se obtiene a partir de aceites vegetales y/o grasas animales.

Lo más habitual es que los ésteres que componen el biodiésel sean metílicos, y entonces se denomina FAME (fatty acid methyl ester).

Si se utiliza etanol para la producción de biodiésel el compuesto se denomina FAEE.

Sus propiedades son bastante similares a las del gasoil de automoción al que complementa o sustituye.

Proceso de producción:

- Transesterificación con la ayuda de un catalizador, de aceites vegetales, grasas recicladas (aceites de fritura) o grasas animales.

- Reacción entre un Triglicérido y un alcohol

Triglicérido: 3 moléculas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol.

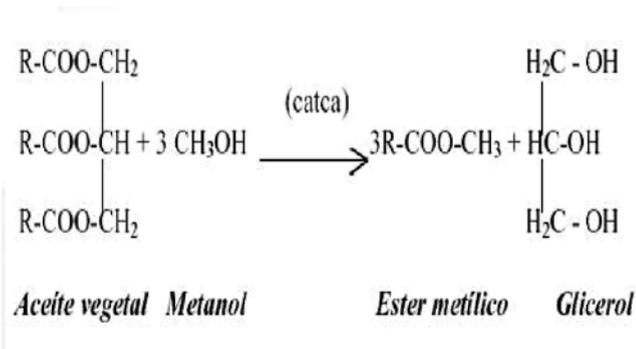
Alcohol: metanol (o bioetanol)

- Propiedades:

- Similares a las del gasoil de automoción en cuanto a la viscosidad y el número de cetano.

- Punto de inflamación superior al gasoil fósil.

En el año 2006 la producción de biodiésel en el mundo fue de 6.350 kt. En este año la producción de la UE suponía el 77% de la producción mundial. Estados Unidos es el segundo productor de biodiésel.

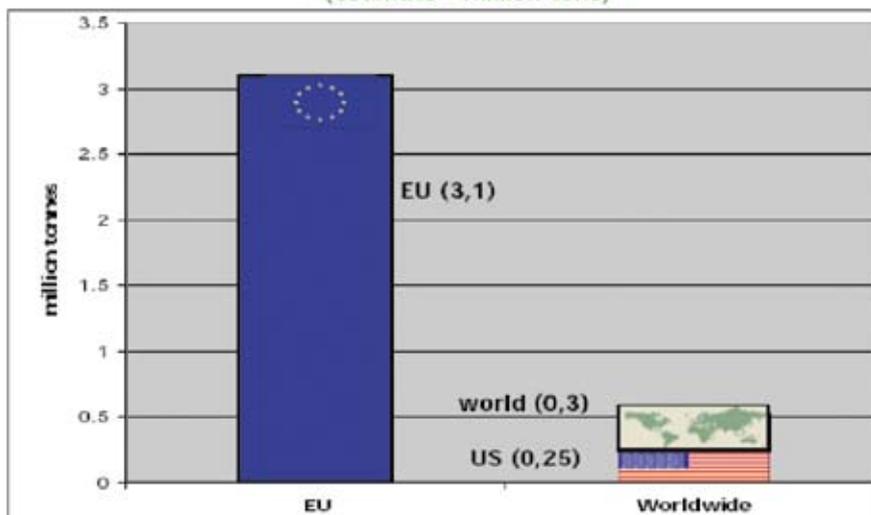


La producción de biodiésel en Europa crece a ritmos muy altos y ha pasado de 3,2 millones de toneladas en el año 2005 a 4,9 millones de toneladas en 2006 (1,9 millones de toneladas en 2004), como se muestra en la figura inferior. El objetivo establecido por la UE para 2010 (5,75% del consumo de gasóleo), probablemente, se alcanzará dos años antes.

El principal productor europeo es Alemania con 2.662 Kt. en 2006. En el mismo año España produjo 99 Kt.

EU and Worldwide biodiesel production in 2005

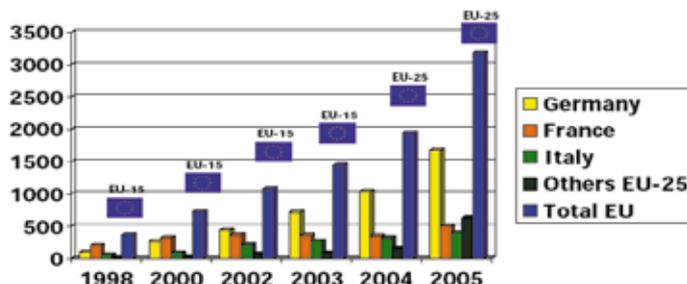
(estimate - million tons)



En el año 2007 la capacidad de producción de biodiésel en la Unión Europea será de 10,6 millones de toneladas.

La reciente modificación de la Ley de Hidrocarburos (Ley 12/2007) ha introducido una obligación de consumo de biocarburantes en el año 2010 del 5,83 % (en contenido energético), pero con el actual ritmo de producción, probablemente el objetivo establecido por la Unión Europea para 2010 (5075% del consumo de gasóleo) se alcanzará dos años antes.

EU Biodiesel production in Member States and in the EU ('000 t)



La aplicación de este porcentaje a la previsión de consumo de gasóleo en el mismo año supodrá el siguiente consumo de biodiésel:

Consumo de biodiésel (Año 2010)

Previsión de consumo de gasóleo de automoción (PER)		Previsión de consumo de Biodiesel (5,83% n tep)		
Ktep	Kt	Ktep	Kt	Mill. Litros
% v/v				
30.915	29.985	1.802	2.053	2.306

Si todos los proyectos de plantas de biodiésel que actualmente están en desarrollo en España se pusieran en marcha, la producción en 2010 superaría en tres veces la obligación del 5,83 % contemplado en la Ley de Hidrocarburos.

Los organismos internacionales avalan el uso de los biocarburantes

La CE, la AIE, el IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) de la ONU y el reciente Informe de las Naciones Unidas (patrocinado por la FAO) sobre bioenergía sostenible, entre otras instituciones políticas y económicas de prestigio, coinciden en que el bioetanol y el biodiésel son combustibles renovables cuyo uso en mezclas con gasolina y biodiésel reducen la incidencia del transporte -25% de los gases de efecto invernadero emitidos a nivel mundial- en el cambio climático.

Existe una amplia coincidencia en que el uso de los biocarburantes reduce la dependencia del petróleo y favorece la diversificación energética, emite menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles y mejora la calidad del aire. Los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) -y en particular los realizados por Ciemat en España- han constatado que la producción y distribución de bioetanol y biodiésel consume menos energía fósil que su energía disponible para uso final, lo cual no ocurre con la gasolina y el gasóleo.

El desarrollo de cultivos -cereales, caña y remolacha de azúcar- para producir bioetanol ó aceites para producir biodiésel, contribuye al desarrollo rural, mejorando los actuales niveles de renta y empleo.

Ventajas del Biodiésel

- **Reduce la dependencia del petróleo y favorece la diversificación energética.** La CE ha señalado que el cumplimiento de los objetivos de biocarburantes de la UE-25 en 2010 contri-

buiría por sí sólo a reducir la dependencia europea del crudo hasta el 73%, o cuatro puntos porcentuales respecto a 2002.

- **Consume menos energía en su producción y distribución que la que contiene.** Según Ciemat, el biodiésel puro (B100) permite un ahorro de energía fósil por cada kilómetro recorrido de un 75 % con respecto al gasóleo. Una mezcla al 10 % de biodiésel con gasóleo (B10) supone un ahorro del 7 %.
- **Emite menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles.** Según Ciemat, el biodiésel puro (B100) evita que se emitan 170 g CO₂ equiv (57 %) por cada Km. recorrido, en comparación con el gasóleo. Una mezcla de gasóleo con un 10 % de biodiésel (B10) permite una reducción de emisiones del 6 %.
- **Mejora la calidad del aire.** La adición de biodiésel al gasóleo reduce la emisión de partículas diesel (hollín), hidrocarburos totales (THC) y CO. Para el caso de biodiésel puro (B100) estas reducciones en comparación con el gasóleo son entre un 63 y un 67 % para el hollín, entre un 60 y 70 % en hidrocarburos totales y un 45 % en CO.
- **Puede mezclarse con gasóleo en los vehículos actuales hasta porcentajes del 100%.**
- **Contribuye al desarrollo rural, mejorando niveles de renta y empleo**

Ciclo de vida del Biodiésel

La energía fósil utilizada para la producción y distribución del Diesel EN-590 es 1,949 MJ/km, en el el BD- 5 es 1,883 MJ/km y en el BD 100 es 0,489 MJ/km.

Las emisiones de gases de efecto invernadero en el Diesel EN-590 es de 157,92 g CO₂ equiv. / km, en el BD-5 es de 151,76 g CO₂ equiv. / km y en el BD-100 38,06 g CO₂ equiv. / km

Logística del Biodiésel

El biodiésel se integra fácilmente en los actuales sistemas logísticos de combustibles fósiles.

La experiencia mundial demuestra que la logística del biodiésel se integra fácilmente en los sistemas logísticos de almacenamiento y distribución de derivados del petróleo.

El transporte del biodiésel desde sus plantas de producción a los terminales de almacenamiento -sean de CLH o de cualquier otro operador- se realiza mediante **camiones** cisterna o también puede llegar a través de los oleoductos, mezclado con el gasóleo en las propias refinerías.

En marzo de 2007 el Consejo de Presidentes de la UE estableció un objetivo vinculante para todos los Estados miembros de un consumo del 10% de biocarburantes en el año 2020.

La CE considera que este objetivo es sostenible sin presionar los mercados alimentarios:

- En sus estudios de prospectiva, la CE considera que la mayor parte del incremento de consumo de aceites vegetales en la UE para la producción de biodiésel, deberá cubrirse con importaciones.
- El Informe de Progreso de Biocarburantes de la CE (enero 2007) afirma que el objetivo de una cuota vinculante de biocarburantes en la UE del 10% en 2020, puede ser gestionable con la

protección del medio ambiente, incluyendo biodiversidad, conservación del suelo, calidad del agua y calidad del aire.

La demanda de materias primas para la fabricación de biocarburantes tiene una escasísima influencia en la deforestación tropical en el Sudeste asiático y Brasil.

El Informe sobre el Progreso de los biocarburantes de la CE (enero 2007) lo afirma de forma categórica. En lo que se refiere a la incidencia del biodiésel en la extensión del cultivo de palma:

- *La producción global de aceite de palma creció entre 2001 y 2005 en casi 10 millones de toneladas.*
- *La cantidad de dicho aceite destinada a la producción de biodiesel ha sido de 30.000 t.*
- *La industria alimentaria es, con gran diferencia, la principal responsable de la creciente demanda de aceite de palma en el mundo.*

La consecución del objetivo del 10 % de biocarburantes en 2020 tendrá un impacto en la naturaleza muy limitado y perfectamente asumible.

- *La Comisión Europea (Informe sobre el Progreso de los Biocarburantes, 2007) afirma que el objetivo del 10% en 2020 se puede conseguir sin necesidad de utilizar los bosques húmedos ni otros habitats de alto valor natural.*
- *La Comisión Europea está elaborando un sistema de certificación de los biocarburantes que permita garantizar que las materias primas cumplen criterios de sostenibilidad.*
- *La producción de biocarburantes puede tener impactos positivos en la biodiversidad, al diversificar los cultivos en sistemas intensivos, pasando del monocultivo al policultivo, y permitir cambiar especies anuales por especies perennes, como la jatrofa, para la producción de biodiésel*

Criterios de la UE para la elaboración de un esquema de sostenibilidad de los cultivos de materia prima para la producción de biodiésel

El objetivo del 10 % de consumo de biocarburantes en todos los Estados miembros en el año 2020 se puede alcanzar bajo un esquema de sostenibilidad de cultivos que debe contemplar:

- *Estándares de sostenibilidad para los biocarburantes elaborados por la CE*
- *Únicamente los biocarburantes que cumplan dichos estándares podrán contar para cubrir el objetivo del 10 %.*
- *Sólo estos biocarburantes tendrán derecho a las exenciones fiscales y serán "elegibles" a efectos de cubrir las obligaciones de consumo.*

Estas reglas se deben aplicar tanto a los biocarburantes producidos en la UE como a los importados.

Abengoa Bioenergía está construyendo junto con Cepsa una planta de Biodiésel en San Roque (Cádiz) de 226 MI de capacidad de producción anual.

Referencias bibliográficas

- Biofuels for Transport. Agencia Internacional de la Energía (AIE). 2005
- Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Panel Intergubernamental del Cambio Climático de la ONU (IPCC). Mayo 2007
- Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers. Naciones Unidas – Food and Agriculture Organization (FAO) . Abril 2007
- Biofuels Progress Report. Report on the Progress made en the use of biofuels and other renewable fuels in the Member States of the European Union. Comisión Económica Europea. Enero 2007
- U.S. Biodiesel Production Capacity. US National Biodiesel Board. Enero 2007
- Facts about Biodiesel. National Biodiesel Board (US).
- Annual Biodiesel Production Statistics. European Biodiesel Board (EBB). Julio 2007
- Biocarburantes y Desarrollo Sostenible. Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA). 2007
- Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el transporte: Análisis de Ciclo de Vidas Comparativo del biodiésel y del diésel. Ciemat. Ministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Educación y Ciencia. 2006
- Biofuels – The Green alternative for transport. Andrid Pielbalgs. Energy Commissioner. International Biofuels Conference. Julio 2007
- EU – 27. Biofuels. Annual 2007. Gain Report. USDA Foreign Agricultural Service. Abril 2007
- Estudio Bibliográfico del Impacto Medioambiental del biodiesel, prestaciones y durabilidad de los motores. Universidad de Castilla- La Mancha. Asociación de Productores de Energías Renovables. Enero 2007
- Calidad del Aire en el Estado Español (2006). Ecologistas en Acción. Julio 2007
- Prospect for Agricultural Markets and Income in the EU. Directorate for Agriculture and Rural Development, EC, January 2007
- US Biodiesel and Brazil Biodiesel. F.O. Lichts. Junio y Julio 2007
- Biodiesel: Handling and Use Guidelines. National Renewable Energy Laboratory, (NREL), 2001
- Biodiesel. The Comprehensive Handbook. Martín Mittelbach y Claudia Remschmidt
- Could jatropha be a biofuel panacea? Angela Hind. Julio 2007
- Biodiesel Production Technology. J. Van Gerpen, B. Shank R. Pruszko. D. Clements y G. Knothe NREL. National Renewable Energy Laboratory
- Biocombustibles. Combustibles Limpios. Mercedes Ballesteros. Ciemat. Julio 2007
- Producción de biodiesel. José Aracil. Universidad Complutense de Madrid. Mayo 2006

CAPÍTULO 13

OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CELULOSA

Santiago Grisolía

Bioquímico

Presidente Ejecutivo Premios Rey Jaime I

Vicepresidente Ejecutivo del Alto Consejo Consultivo en I+D+I de la Presidencia de la Generalitat Valenciana

Mi interés en la celulosa empezó hace muchísimos años cuando me enteré de los experimentos del único Premio Nobel Filandés, el Prof. Artturi Virtanen, que mantuvo en perfecto estado de salud un rebaño de vacas, alimentándolas durante mucho tiempo con tan sólo papel de periódico y urea. Más tarde, viviendo en una casa, que como la mayor parte de las viviendas en los Estados Unidos estaba construida fundamentalmente de madera, me impresionó la capacidad destructora de las termitas, que atacaban las paredes del edificio, es decir, que en la naturaleza existen métodos enzimáticos para degradar la celulosa, porque la mayor parte de las plantas es materia estructural.

La conversión de la biomasa a etanol empieza con el conocimiento de la complejidad estructural y química de los tres polímeros primarios que componen las paredes de las células de las plantas: Celulosa, Hemicelulosa y Lignina.

Dependiendo del tipo y especie de la planta, la humedad y el peso de la pared de sus células, tendrá entre el 35 y el 50% de celulosa, del 20 al 35% de hemicelulosa, y entre un 10 y un 25% de lignina. La celulosa es el biomaterial más abundante en la tierra. Cada molécula de celulosa es un polímero lineal de residuos de glucosa (fig. 1).

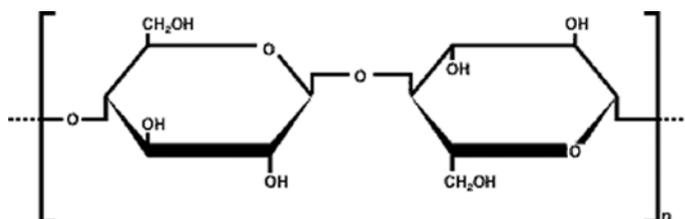


Fig. 1. Estructura de la celulosa: se trata de una cadena de moléculas de β -glucosa unido por enlaces que la hacen insoluble al agua.

Dependiendo del grado de las uniones de hidrógeno, y entre las moléculas de celulosa, este polisacárido se encuentra en forma paracristalina (amorfa) o cristalina. La celulosa existe dentro de una matriz de otros polímeros, hemicelulosa y lignina principalmente. La hemicelulosa es un polímero de azúcar compuesto en su mayor parte de pentosas y algunas hexosas. La lignina (fig. 2) es un polímero complejo de enlace-cruzado, altamente aromático y que está covalentemente unido a la hemicelulosa, por lo tanto estabiliza la maduración de la pared de la célula. Estos polímeros proporcionan a la pared de las células fuerza y resistencia contra la degradación, lo cual convierte también a estos materiales en un desafío para usarlos como sustratos para la producción de biofuel.

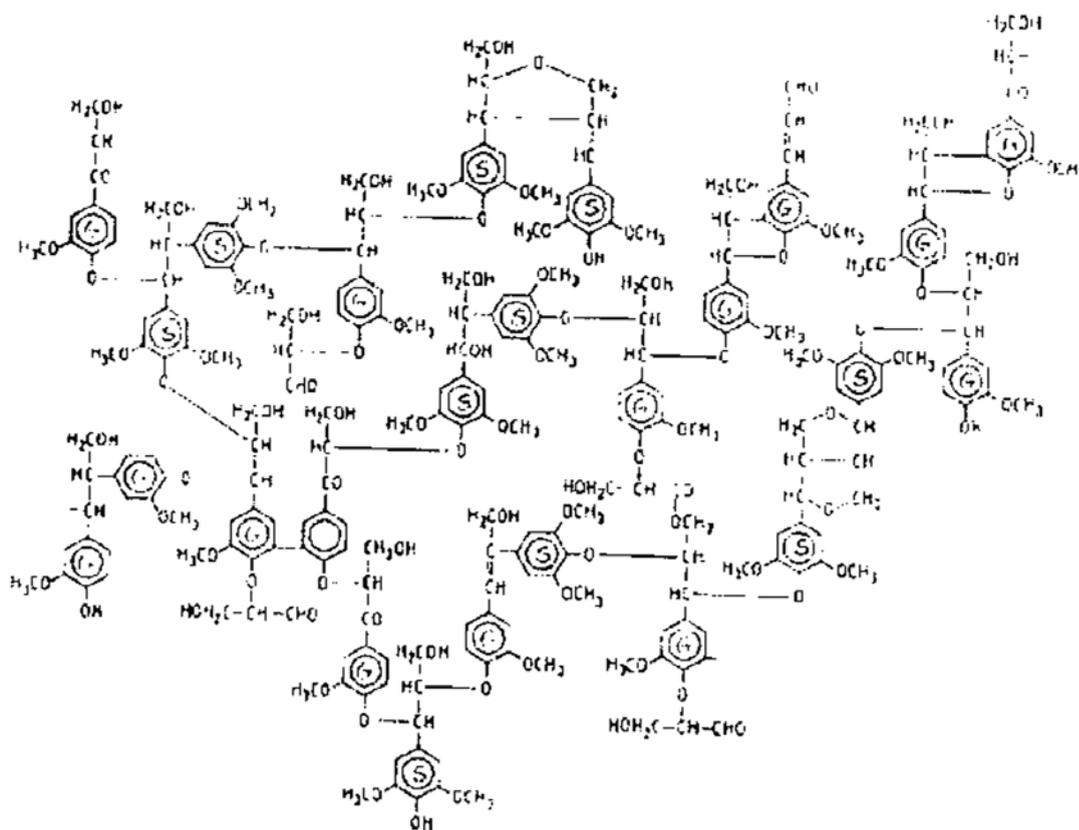


Fig.2 Una de las posibles estructuras de la lignina, rica en alcoholes fenilpropilicos.

Los enzimas tales como las celulasas, hemicelulasas, y la glicosil hidrolasa, enzima sintetizado por una bacteria y un hongo, trabajan juntos de una forma sinérgica para degradar la estructura de los polisacáridos en la biomasa. No obstante, estos sistemas enzimáticos son un complejo como los sustratos de la pared de la célula de la planta a la que atacan. Por ejemplo, la preparación de la celulosa comercial son mezclas de varios tipos de glicosil hidrolasa y cada una de ellas con diferentes funciones (exocelulasas, endocelulasas, exoxycelulasas, celobiasas y muchas otras). La optimización de estos enzimas requerirán una comprensión más detallada de su regulación y actividad, ya que son un sistema altamente organizado y estrechamente controlado.

En la actualidad, normalmente, como muestra la fig. 3, la conversión de biomasa a etanol, conlleva 3 pasos básicos (1) tratamientos termoquímicos de la biomasa celulósica limpia para hacer al complejo de polímeros más accesible a la acción enzimática; (2) producción y aplicación de preparaciones enzimáticas especiales (celulosa y hemicelulosa) que hidrolizan los polisacáridos de las paredes de las células de las plantas en una mezcla de azúcares simples; y (3) la fermentación, mediante bacterias o levadura, para convertir esos azúcares en etanol. El sistema resulta poco eficiente. Se necesita un conocimiento más completo de los enzimas y microbios involucrados en la conversión de biomasa a etanol, para superar las ineficiencias actuales del proceso de producción.

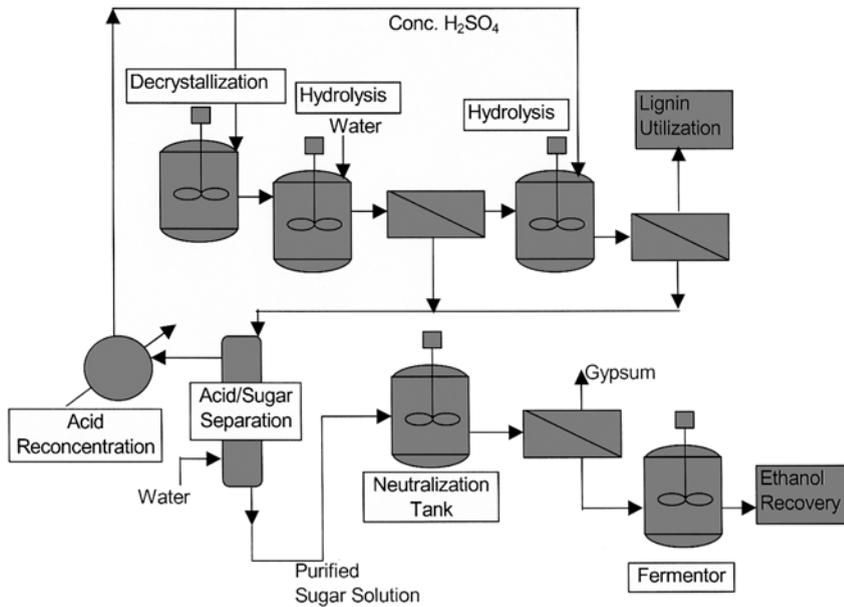
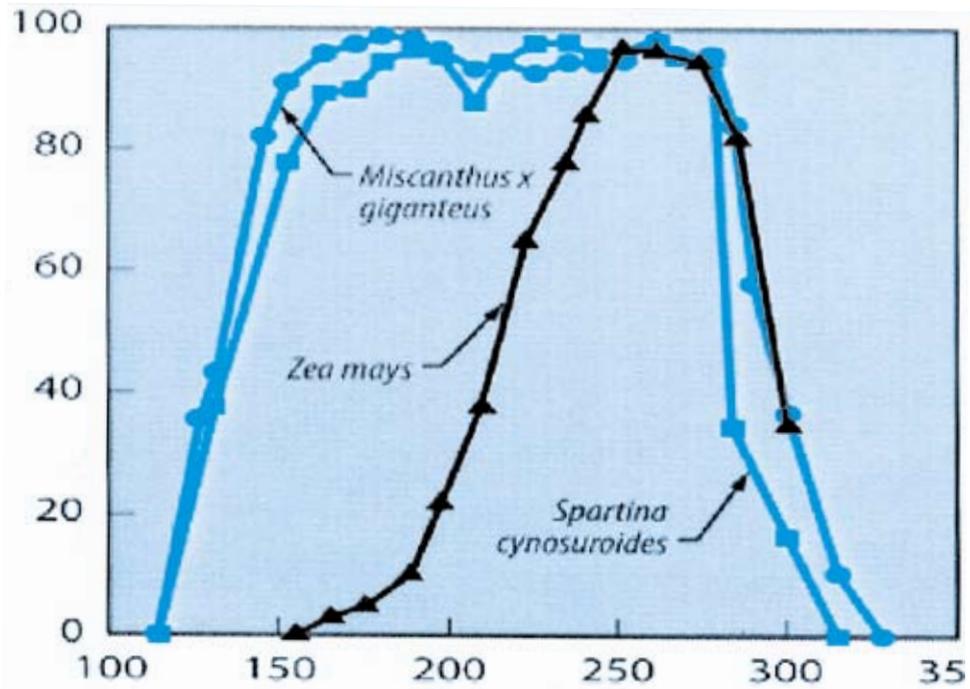


Fig. 3 Esquema de la actual síntesis de etanol a partir de material procedente de las plantas.

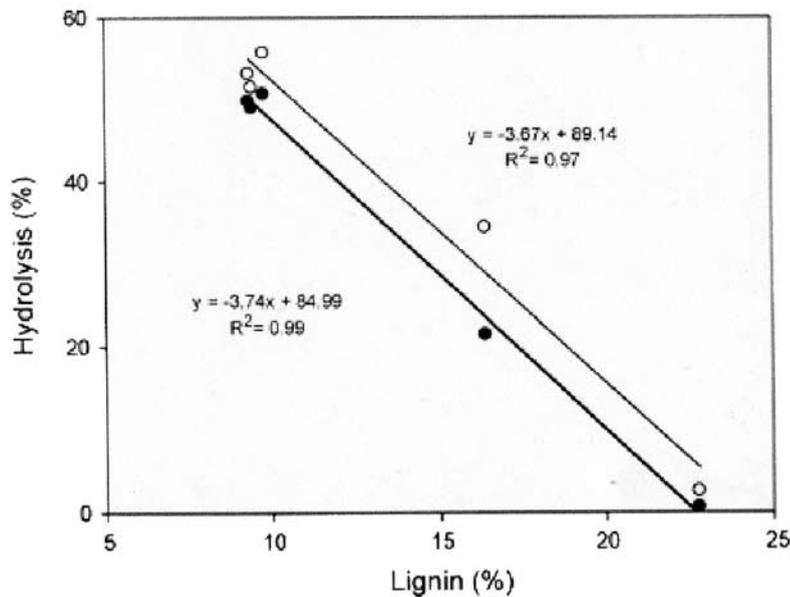
Una de las propuestas biológicas al respecto, además de utilizar para la fabricación de etanol plantas de hoja perenne en lugar de maíz, puesto que en ellas, la incorporación de nutrientes es más efectiva dado que la fotosíntesis neta anual es mayor, con lo que el rendimiento aumenta, lo que recoge la gráfica 1.

De hecho, el maíz no parece la planta idónea para la obtención de etanol.

Entre las alternativas para aumentar la producción de bioetanol, uno de los objetivos consiste en conseguir plantas con menores porcentajes de lignina y hemicelulosa que las actuales a favor de un incremento del porcentaje de celulosa, pero hay muchas posibilidades. La gráfica 2 muestra la relación inversa entre el porcentaje de lisina y el porcentaje de recuperación de azúcares por hidrólisis enzimática obtenida en miscanthus, una de las plantas de la familia de las gramíneas cuyo potencial generador de bioetanol está siendo estudiado, puesto que llega a crecer hasta más de 3 metros en 5 años, y tiene una alta biomasa.



Gráfica 1. Muestra la fotosíntesis neta anual (área bajo la curva) de diversas especies de hoja perenne (en mostaza) frente al maíz (en azul)



Gráfica 2. Tomada de D. Vrije et al (2002) Int. J. Hydrogen Energy 27,1381 en que se observa la correlación lineal inversa entre la cantidad de lignina y la hidrólisis enzimática de azúcares obtenida.

La figura 4 recoge varios de los retos que la ingeniería genética y otras ramas de la ciencia afrontan para mejorar las plantas destinadas a la obtención de bioetanol.

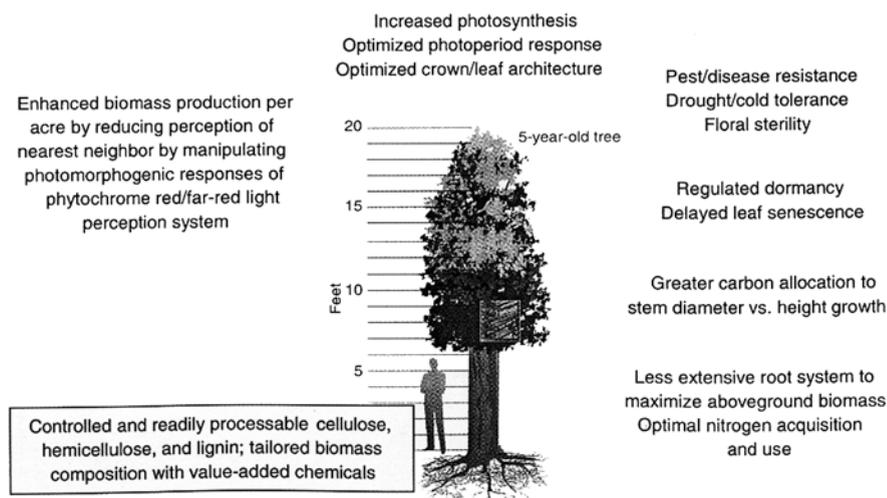


Fig.4 Modificaciones en las plantas que optimizarían la producción de bioetanol y reducirían la emisión de gases invernadero.

La investigación de bioetanol

Perfeccionar las celulosas. Acelerar el desarrollo de sistemas óptimos de celulosa proporcionando recursos para cientos de selecciones de variantes de enzimas naturales y modificados, para permitir alto rendimiento en la producción y análisis funcional de estos enzimas, aclarando controles regulatorios e interacciones esencialmente moleculares, y desarrollando modelos para analizar la estructura y actividad de sistemas enzimáticos naturales y sintéticos.

El objetivo a largo plazo es el bioprocesador integrado, la conversión de biomasa en etanol en un solo paso. El logro de esto requiere el desarrollo de un organismo multifuncional modificado genéticamente, o una mezcla estable de cultivos capaz de llevar a cabo todas las transformaciones biológicamente interpuestas, que se necesitan para una conversión completa de la biomasa en etanol.

Deficiencias en el conocimiento científico. Sin la mejora de nuestro conocimiento de procesos esenciales microbianos será difícil desarrollar y mejorar tecnologías basadas en este entendimiento. La biotecnología de la innovación requiere investigaciones básicas que exploran una gran variedad de enzimas y microorganismos, análisis de enzimas como sistemas y determinar como ciertos factores influyen en la degradación de la producción de etanol biomasa. Varias preguntas, fundamentalmente científicas, incluyen:

- *¿Cuál es el grado de diversidad natural entre la degradación de biomasa y organismos etanologénicos.* Durante los últimos 30 años aproximadamente, la mayoría de la investigación destinada a la producción de etanol desde la celulosa, se ha centrado en sistemas de hongos (principalmente *Trichoderma reesei*) para la conversión de celulosa en azúcares, o en la levadura para la fermentación de azúcar (*Saccharomyces cerevisiae*). No obstante, es necesario un conocimiento más profundo de una

gran variedad de sistemas celulóticos y etanológicos. Para hidrolizar la celulosa se conocen especies bacterianas de diversos grupos fisiológicos (por ejemplo, bacterias con varios niveles de tolerancia para concentraciones de oxígeno, temperatura y sal); así una amplia gama de hábitats debería explorarse para nuevas actividades celulóticas en las bacterias.

- La hidrólisis de celulosa cristalina es considerado como el paso límite en la conversión de biomasa en etanol porque las soluciones acuosas de los enzimas, tienen dificultad para actuar en esta estructura insoluble, sumamente ordenada. Las moléculas de celulosa, en su forma cristalina, son difíciles de impregnar, no solo por los enzimas, incluso por pequeñas moléculas como el agua.

- Las celulasas y las hemicelulasas se encuentran en las células como enzimas libres o como largos complejos extracelulares conocidos como celulosomas. La actividad colectiva de estos sistemas enzimáticos es mucho más eficiente que la actividad individual de un enzima aislado; por lo tanto, para comprender bien su función deben ser estudiados más como un sistema que individualmente. Además, estos sistemas deben ser analizados bajo condiciones de laboratorio más representativas de un ambiente del mundo real, ya que los laboratorios a menudo usan celulosa purificada como el sustrato para la acción de enzimas en lugar de materiales linocelulósicos más heterogéneos y naturales.

- Las celulasas actúan óptimamente a temperaturas (40°C) más altas que las toleradas por organismos etanológicos, así que, actualmente, estos dos procesos no pueden ser consolidados en un solo proceso.

- *¿Cómo podemos mejorar sistemas para crear genéticamente microorganismos involucrados en la producción de bioetanol?* Mientras muchos estudios han expresado genes de organismos celulóticos en *Escherichia coli* u otros organismos mesófilos, los sistemas para expresar genes extraños en organismos celulóticos o termófilos necesitan de conocimientos adicionales. Una de las últimas propuestas sugeridas por el Premio Nobel de Física Steven Chu, consiste en la utilización de las bacterias *Microbulbifer degradans*, presentes en el tubo digestivo de diversos rumiantes y de las termitas. Estas bacterias son responsables de la degradación anual de millones de toneladas de celulosa, lo que permite la digestión de los tallos y la madera por los rumiantes y termitas respectivamente.

Capacidades científicas y tecnológicas que se requieren

Para aumentar el conocimiento actual de producción de bioetanol se requerirá un variedad de nuevas capacidades incluyendo técnicas para conocer mejor la diversidad de enzimas; visualizar sistemas enzimáticos; producir sistemas enzimáticos eficientemente y proteínas de membranas; cultivar uniones de microbios; transcriptómicos integrados, proteómicas y metabolómicas; y crear genéticamente microorganismos.

En definitiva, como dijimos al principio, se necesita mucha investigación y tecnología, y es una buena ocasión para los jóvenes deseosos de proteger el medioambiente y desarrollar una actividad científica intelectualmente estimulante.

Referencias

Armin Wagner, John Ralph, Takuya Akiyama, Heather Flint, Lorelle Philips, Kirk Torr, Bernadette Nanayakkara, and Lana Te Kiri. PNAS "Exploring lignification in conifers by silencing hydroxycinnamoyl-

CoA:shikimate hydroxycinnamoyltransferase in *Pinus radiata*"; Vol. 104; no. 28; 10 July 2007; pp. 11856-11861.

José Goldemberg; Environmental Research Letters (Institute of Physics Publishing) "The ethanol program in Brazil"; Environ. Res. Lett. 1 (2006) 014008 (5pp).

Mercedes Ballesteros Perdices; Investigación y Ciencia; "Bioetanol"; noviembre 2006; pp. 78-85.

Arthur J. Ragauskas, Charlotte K. Williams, Brian H. Davison, George Britovsek, John Cairney, Charles A. Eckert, William J. Frederick Jr., Jason P. Hallett, David J. Leak, Charles L. Liotta, Jonathan R. Mielenz, Richard Murphy, Richard Templar and Timothy Tschaplinski; Science; "The Path Forward for Bio-fuels and Biomaterials"; Vol. 311; 27 January 2006; pp.484-489.

CAPÍTULO 14

La energía de fisión nuclear

Enrique M. González Romero

*Director de la División de Fisión Nuclear
CIEMAT*

Introducción

Las ocho centrales nucleares en operación en España generan el 20% de la electricidad consumida, proporcionándola de forma segura y predecible, con un coste prácticamente independiente de los avatares de los mercados internacionales, una seguridad de suministro inmune a las incertidumbres de la política internacional y con un efecto mínimo sobre el medioambiente. Estas centrales que operan de forma continuada día y noche no producen gases de efecto invernadero y aíslan de forma exhaustiva sus residuos radiactivos, almacenándolos de forma segura para evitar sus efectos sobre las personas o la biosfera. Su capacidad de generar electricidad de forma fiable y a bajo coste constituye una enorme riqueza para cualquier país industrializado.

Las características de esta energía junto con el incremento del precio del petróleo y el gas, el continuo crecimiento en la demanda de energía a nivel mundial y la correlación del consumo de electricidad con el desarrollo de las sociedades, la preocupación por imponer requisitos crecientes de reducción de residuos y respeto integral al medio ambiente, están favoreciendo un análisis racional de la Energía Nuclear, que en muchos países industrializados hace que, en la opinión pública, prevalezcan sus ventajas sobre sus riesgos. Los continuos desarrollos tecnológicos de esta industria están proporcionando nuevas generaciones y nuevas tecnologías, ya en fase de pruebas, que en el futuro próximo la harán aún más sostenible, con un uso optimizado de los minerales disponibles que durarán miles de años y con una reducción muy significativa de los residuos radiactivos. Como ya se tiene en cuenta en los estudios internacionales más autorizados, la Energía Nuclear de fisión es una de las apuestas más seguras a corto y medio plazo para responder a las necesidades energéticas de los próximos años, sin comprometer el medioambiente para las generaciones futuras ni la competitividad de las presentes.

La Energía Nuclear en España

En España 8 centrales nucleares, Tabla 1, con una potencia instalada de 7700 MW eléctricos generaron en 2006 el 20% de la electricidad consumida y lo hicieron de forma segura y predecible [1]. De

estos reactores 6 son de agua a presión y 2 de agua en ebullición, contándose en total con tres tipos de tecnologías. Los reactores españoles empezaron a entrar en operación en 1969, aunque 7 de las centrales en operación entraron en explotación comercial entre 1981 y 1988. Estos reactores, inicialmente diseñados para operar durante 40 años, son autorizados por periodos de típicamente 10 años y 7 de ellos recibieron su última autorización alrededor del año 2000.

El sector nuclear está ampliamente desarrollado en España, bien adaptado a la explotación segura de nuestras centrales, capacitado para la investigación y desarrollo de nuevas soluciones técnicas y para mejorar las actuales y competitivo a la hora de conseguir participaciones en proyectos de construcción, actualización y desarrollo de nuevas instalaciones nucleares a nivel internacional.

Tabla 1: Centrales nucleares españolas

Central	Potencia eléctrica inicial (MW)	Potencia eléctrica (MW)	Tipo de reactor (suministrador)	Fecha de operación comercial	Autorización explotación actual	Plazo validez Autoriza
Santa María de Garoña	460	466	BWR (General Electric)	11-mayo-71	5-julio-99	10 años
Almaraz I (Cáceres)	930	977	PWR (Westinghouse)	1-mayo-81	8-junio-00	10 años
Almaraz II (Cáceres)	930	980	PWR (Westinghouse)	8-octubre-83	8-junio-00	10 años
Ascó I (Tarragona)	930	1.032,50	PWR (Westinghouse)	10-diciembre-84	1-octubre-01	10 años
Ascó II (Tarragona)	930	1.027,20	PWR (Westinghouse)	31-marzo-86	1-octubre-01	10 años
Cofrentes (Valencia)	975	1.092	BWR (General Electric)	11-marzo-85	19-marzo-01	10 años
Trillo I (Guadalajara)	1.000	1.066	PWR (Siemens-KWU)	8-marzo-88	14-julio-00	10 años
Vandellós II (Tarragona)	982	1.087,14	PWR (Westinghouse)	6-agosto-88	16-noviembre-04	10 años

Los principales actores dentro del sector nuclear español son:

Las centrales nucleares: son las responsables de la generación de electricidad. Las principales características de las centrales en operación se describen en la *Tabla 1*. Parte de estas centrales son de propiedad compartida entre distintas compañías eléctricas, que a su vez se organizan dentro de la asociación UNESA.

CSN: El Consejo de Seguridad Nuclear es el encargado de regular las actividades en el sector y de vigilar el cumplimiento de estas normas, asegurando que la explotación de la Energía Nuclear no pueda tener repercusiones negativas para la población.

ENUSA: que con La planta de fabricación de combustibles de Juzbado (Salamanca), es capaz de construir buena parte de los combustibles para nuestras centrales nucleares y que además exporta la mitad de su producción a otros países.

ENRESA: Empresa nacional encargada de la gestión de los residuos radiactivos, incluyendo sus transportes, aislamiento del medio ambiente y desmantelamiento de instalaciones nucleares. Además de gestionar los residuos de la energía nuclear también se encarga de los residuos radiactivos médicos, industriales y de investigación. ENRESA opera la instalación del Cbril, en la que se almacenan todos los residuos de media y baja actividad de estas actividades y que está dimensionado para recibir, al menos, todos los residuos previstos durante la operación de las actuales centrales hasta su desmantelamiento.

ENSA: Fabricante de equipos pesados y piezas para las centrales nucleares, altamente competitiva y que interviene en proyectos de construcción en todo el mundo.

Ingenierías especializadas: Tecnatom, Empresarios Agrupados, Sener, Initec, Soluziona, Iberinco, Intecsa, y otras que han demostrado su capacidad para diseñar, mantener y entrenar al personal de estas centrales.

CIEMAT: El centro nacional de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas y varias universidades con estudios de Ingeniería y Física nuclear. Estas instituciones desarrollan amplios programas de investigación, centradas en la seguridad de operación, la gestión de residuos radiactivos y los diseños de instalaciones nucleares futuras. La mayor parte de la investigación tiene una amplia componente internacional, y la calidad de nuestros centros de investigación está avalada por su capacidad de liderar una parte de los programas de EURATOM.

La Energía Nuclear en el Mundo

En el mundo hay un total de 439 centrales nucleares, Figura 1, y 30 más se encuentran en proceso de construcción, [2]. En Europa, casi el 30% de la electricidad proviene de la Energía Nuclear mientras que a nivel mundial, las centrales nucleares producen aproximadamente el 17% de la electricidad que se consume. Por su parte, Francia ha demostrado que es posible para un país generar más del 80% de su electricidad a partir de la Energía Nuclear de forma sostenible.

Hay planes de construir, al menos, 73 reactores más en un futuro próximo. China tiene programado construir 33 reactores, seguida de Japón con 12 y Rusia con 9. Entre China e India tienen previsto construir 60 nuevos reactores en los próximos 15 años y Rusia construirá otros 15 en el mismo periodo de tiempo. En Europa hay proyectos de nuevas plantas en Francia, Finlandia y Bulgaria, más los de los nuevos reactores experimentales, al menos, uno de ensayo de materiales y otro de espectro rápido. Por su parte, EEUU ha

extendido la vida de 48 centrales muy parecidas a las españolas de 40 a 60 años y su gobierno está promocionando la construcción de 5 nuevos GWe de origen nuclear. Rusia también ha relanzado su industria nuclear civil, con 7 reactores nucleares actualmente en construcción.

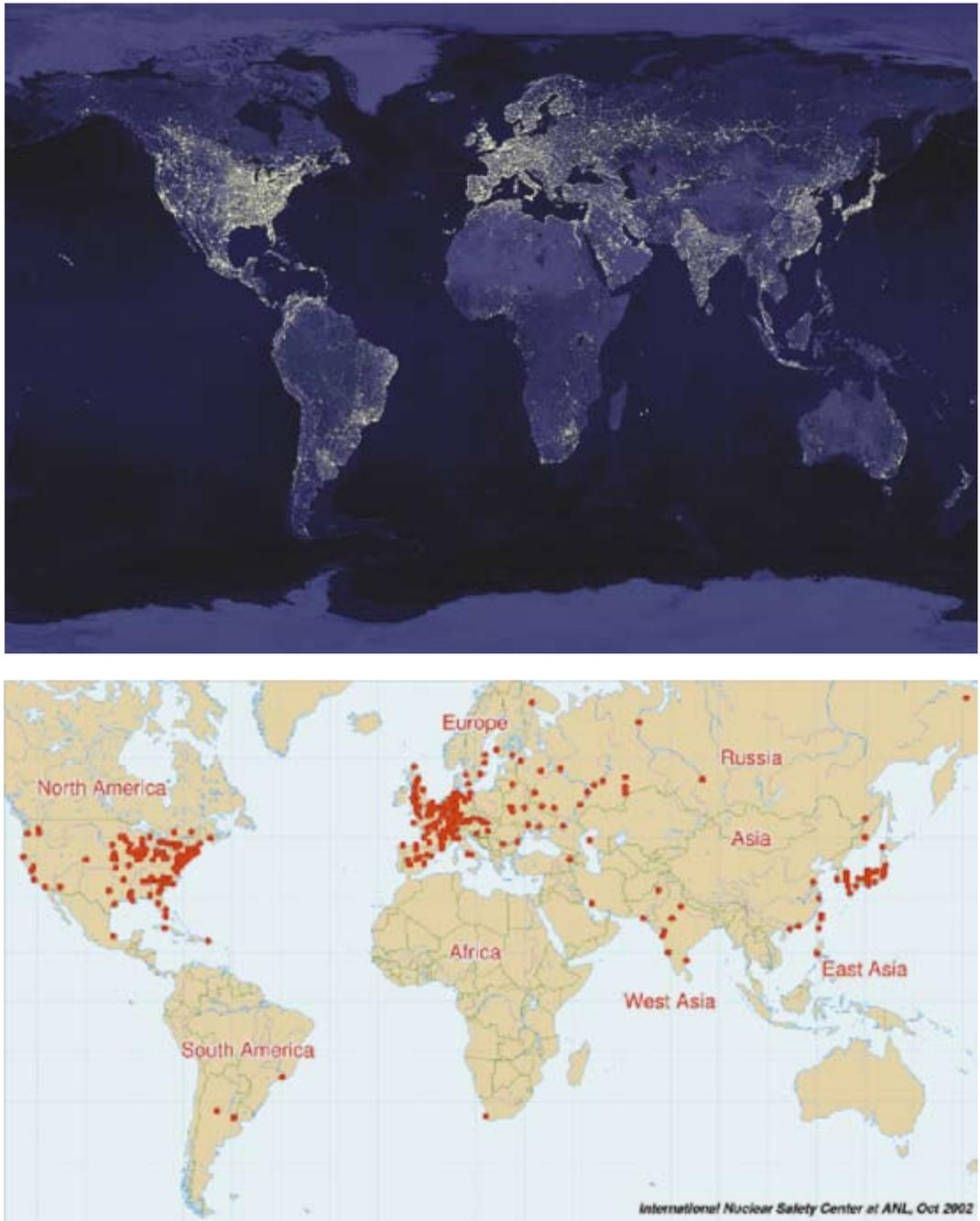


Figura 1: Imagen nocturna de la tierra comparada con la distribución de centrales nucleares

Características actuales de la Energía Nuclear

La ciencia de la fisión nuclear es bien conocida y con una tecnología madura, aunque no han sido desarrolladas todas sus posibilidades y los nuevos experimentos siguen abriendo más opciones. La energía se produce por la reacción en cadena de fisiones nucleares de U y Pu, Figura 2. Su característica fundamental es la elevada cantidad de energía por reacción y por cada átomo de combustible utilizado, más de 100 millones de veces superior a las reacciones químicas de la combustión de los combustibles fósiles. Como consecuencia de esta característica, la fisión nuclear presenta ventajas intrínsecas como una alta capacidad de generación de calor, alta capacidad de almacenamiento de combustible y un bajo efecto del precio del combustible en la electricidad. Estos puntos favorecen la garantía de suministro de energía basada en reactores nucleares.

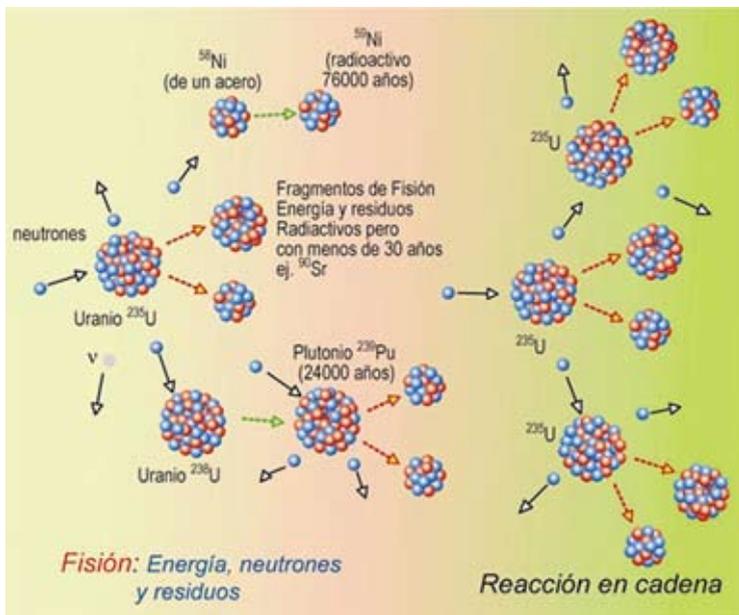


Figura 2: Esquema de los procesos físicos de la Energía Nuclear

Por otra parte, en la fisión se producen inevitablemente dos o más fragmentos del núcleo, conocidos como fragmentos de fisión, FF, que generalmente son radiactivos. La producción de estos FF es inevitable, pero la mayor parte de su radioactividad se debe a isótopos de vida corta (<30 años) de forma que, esta parte de los residuos inevitables se reduce drásticamente por sí sola al cabo de 300 años. Por otra parte, en la fisión se generan neutrones que son necesarios para mantener la cadena de fisiones pero que, a su vez, generan otros materiales radiactivos, actínidos de vida muy larga (Plutonio, Américo, Curio, Neptunio, . . .) a partir del Uranio y otros de masa y duración intermedia a partir de los materiales estructurales del reactor. La cantidad de estos residuos depende drásticamente de los combustibles usados y del diseño del reactor, de forma que no son intrínsecos y pueden ser minimizados por la tecnología.

El calor así generado por estas fisiones se transforma en electricidad de forma similar a otras centrales térmicas, utilizando técnicas y materiales de una industria madura y de alta tecnología.

Entre las características fundamentales de esta industria, destacan como positivas:

- Es segura, siendo la industria que inventa el control y garantía de calidad, fácil de detectar contaminaciones, la industria más regulada y controlada;

- Es respetuosa con el medio ambiente ya que no emite CO₂, ni otros gases de efecto invernadero, no produce lluvia ácida, no modifica el paisaje a gran escala, no produce enfermedades respiratorias, ni ruido, no afecta de forma global a la fauna;
- Tiene una gran capacidad de generación de forma continua y predecible, que permite garantizar el suministro de electricidad;
- Presenta unos costes competitivos y predecibles;
- Se basa en una tecnología madura que, además, impone y genera industria de elevado nivel tecnológico y alto valor añadido;
- Su fuente potencial de impacto al medio ambiente o a las personas, son los residuos radiactivos que, en España, apenas llegan al 0.1% de todos los residuos tóxicos y peligrosos.

Por otra parte, sus principales dificultades aparecen en la percepción pública de los riesgos asociados a instalaciones nucleares, los riesgos de inversión para la construcción que, dependiendo de la coyuntura, pueden ser difíciles de asumir, los riesgos de proliferación, utilización de materiales nucleares para usos no deseables, particularmente si se generaliza su uso en países con infraestructura deficiente (problema similar al transporte aéreo que requiere de fuertes organismos de control internacionales). Finalmente, para su uso a muy largo plazo (>100 años) podrían aparecer problemas de suministro de combustibles si se siguen utilizando los reactores actuales. Este último problema se resuelve utilizando una tecnología diferente (reactores de neutrones rápidos) que esta en fase muy avanzada de desarrollo y para la que se han realizado varios modelos a escala industrial.

La Energía Nuclear frente a los retos energéticos actuales de la UE

Las características antes indicadas de la Energía Nuclear la hacen especialmente bien adaptada a los objetivos de la UE y sus compromisos con el protocolo de Kyoto: proporciona garantía de suministro energético, contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, y con su bajo coste y estabilidad resulta competitiva y aumenta la competitividad de la UE. Las soluciones a estos objetivos de la UE son especialmente importantes para España por sus características de isla energética, por su importante exceso de emisiones de CO₂ en más de un 35% sobre los compromisos de Kyoto, y por su dependencia exterior que supera el 85% sobre sus necesidades energéticas.

Garantía de suministro: por una parte la Energía Nuclear reduce la dependencia energética del exterior y del mercado, puesto que el combustible se puede almacenar para periodos largos (por ejemplo es práctica habitual, acopiar el combustible nuclear (para 12-24 meses) en la central al menos dos meses antes del inicio de la parada de recarga). Además, la mayor parte de los países suministradores son aliados, están dispersos geográficamente y son políticamente estables.

En otro sentido de la garantía de suministro, la Energía Nuclear proporciona energía de forma continua y predecible 24 horas al día los 365 días del año y su generación no depende de la climatología ni de otros agentes externos. De hecho de forma sistemática la Energía Nuclear presenta el máximo número de horas de operación por año de todas las fuentes energéticas, Figura 3.

Competitividad: El coste de generación total de la electricidad es similar para la Energía Nuclear y el carbón, mientras que el gas es algo más caro y la eólica aún más cara. Además, en el caso de la Energía

Nuclear el coste es muy poco dependiente del coste del combustible, Figura 3, por lo que al aumentar el coste de los combustibles fósiles, la energía nuclear resultará aun más competitiva.

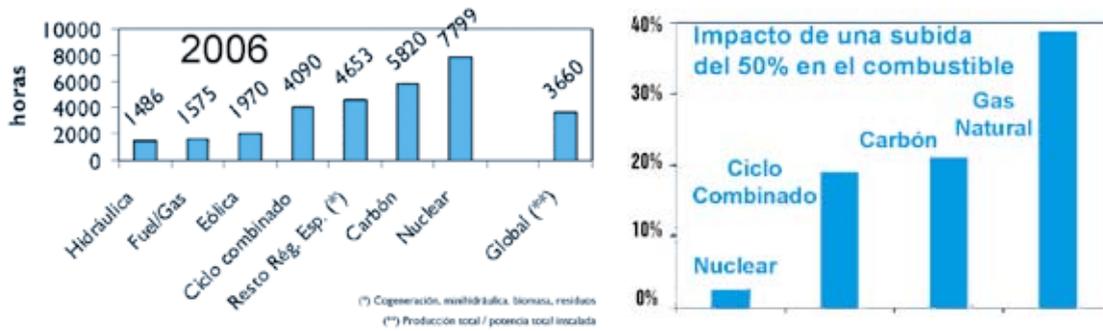


Figura 3: Número de horas de operación por año de forma sostenida e impacto del coste del combustible en la generación de electricidad de distintas fuentes energéticas.

La Energía Nuclear contribuye a limitar las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.

Las centrales nucleares, CC.NN. son una fuente de producción de electricidad limpia, ya que no generan gases ni partículas causantes del efecto invernadero. Las CC.NN. no emiten CO₂ en su operación y cuando se tiene en cuenta todo el ciclo de generación de electricidad, desde la construcción al desmantelamiento, es la que menos emisiones de CO₂ equivalentes presenta, Figura 4, por debajo de la eólica, solar fotovoltaica o la hidroeléctrica. En España la Energía Nuclear evita la emisión de 40 millones de toneladas de CO₂ lo que permitirá ahorrar unos 5000 millones de € en el periodo 2008-2012 de cuotas del protocolo de Kyoto. Por su parte, en la UE la Energía Nuclear evita emisiones equivalentes a casi el doble del transporte aéreo o al 60% del transporte por carretera en vehículos privados.

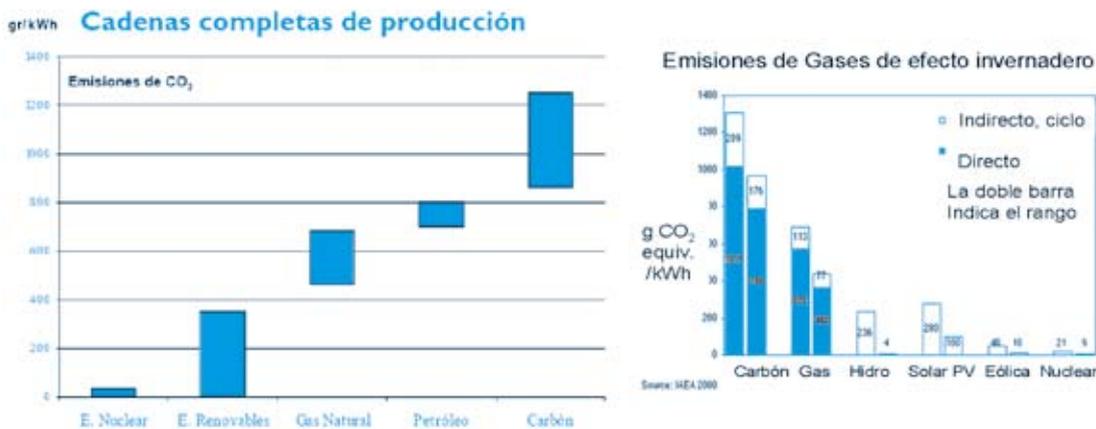


Figura 4: Emisiones de gases de efecto invernadero de las cadenas completas de producción de distintas fuentes de energía.

Seguridad y Residuos: Los dos aspectos más criticados de la Energía Nuclear

Seguridad: Las centrales nucleares se diseñan de manera robusta y segura, y se encuentran entre las instalaciones industriales mejor protegidas. El concepto básico de seguridad nuclear se apoya en el principio de barreras múltiples colocadas en serie entre los productos radiactivos y el medio ambiente.

La seguridad en la operación se introduce desde el diseño. El concepto de las centrales proporciona una seguridad intrínseca. Las características de las centrales nucleares españolas y de todas las de utilización comercial en el mundo, salvo las de diseño RBMK ruso, hacen que en la situación hipotética de que, por causas conocidas o no, las centrales se desvíen de su funcionamiento normal, la central tienda a volver, por las leyes de la física, a su operación normal o a pararse de forma segura (Coeficientes de reactividad negativos para temperatura y densidad). La única excepción aparece en los reactores RBMK en condiciones especiales, que desgraciadamente fueron inducidas en Chernobil produciendo el bien conocido y desgraciado accidente. Además, se incorporan al diseño múltiples sistemas de seguridad incorporada (salvaguardias tecnológicas, sistemas de parada de seguridad, seguridad física, etc.), que de forma anticipada, redundante y conservadora evitan que la central pueda llegar a situaciones peligrosas.

Junto al diseño, la base de la seguridad de la utilización de la Energía Nuclear es el sistema de licenciamiento, que se aplica no sólo a las CC.NN. sino a todas las instalaciones involucradas en la Energía Nuclear o en la manipulación de materiales radiactivos. Este sistema exige que una autoridad independiente evalúe y conceda el permiso para las instalaciones propuestas, por adelantado, con publicidad y aplicando un análisis de seguridad a ultranza. Estos análisis garantizan que todos los reactores nucleares sean operados de forma segura, pero la investigación proporciona continuos avances en el conocimiento de estas instalaciones, por lo que el parque nuclear español invierte al año unos 150 M€ en mejorar continuamente la seguridad de sus instalaciones.

Este organismo regulador en España es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), y tiene asignada la responsabilidad de garantizar la seguridad de las CC.NN. y resto de instalaciones radiactivas o nucleares. Por su parte, el análisis de seguridad a ultranza garantiza una probabilidad de fallo muy baja. Para ello, se estudian todos los posibles fallos en operación normal, en caso de accidente e incluso en aquellas situaciones peligrosas, pero a las que no se conoce una forma de llegar. Para cada situación se evalúan posibles daños y se exige demostrar, por redundancia en sistemas de detección, corrección y contención que las probabilidades de daño a las personas o al medioambiente sean extraordinariamente bajas.

Los residuos radiactivos: Las centrales nucleares han adoptado el principio de retener y aislar sus residuos de forma que estos no puedan llegar a interactuar con el medio ambiente o las personas y evitando así los posibles daños. Los residuos radiactivos son controlados sistemáticamente y acumulados en instalaciones apropiadas. Esta actitud contrasta con otras industrias que envían de forma continua sus residuos al medio ambiente. Por ejemplo, en España los combustibles usados de las centrales nucleares actualmente en operación comercial, nunca han salido de las centrales y por lo tanto nunca han podido dañar al medio ambiente.

En la explotación de la Energía Nuclear, se generan distintos tipos de residuos en función del tipo y energía de las radiaciones emitidas y de la vida media de desintegración, lo que duran, los isótopos radiactivos contenidos en los residuos. Cada año las centrales nucleares españolas general un total de 160 toneladas de combustible gastado, que es de alta actividad, y 2.000 toneladas de residuos de baja y media

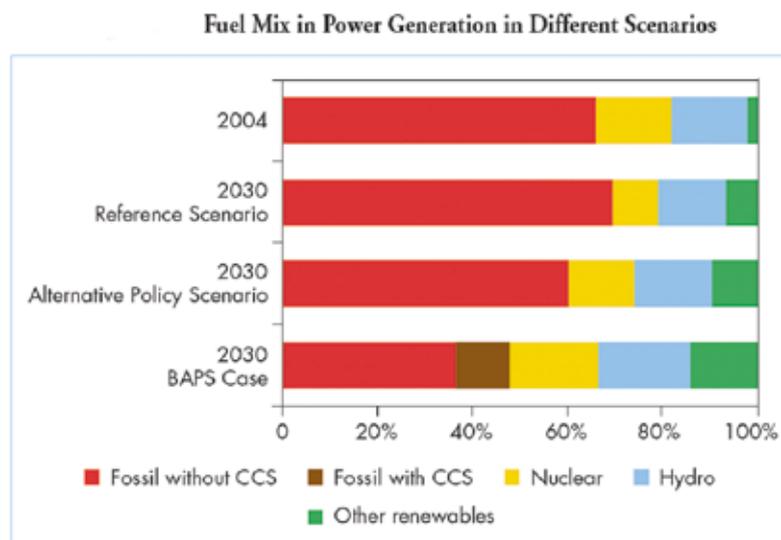
Finalmente estos residuos serán enviados a un Almacén Geológico Profundo, AGP. En este almacén los residuos son guardados a 500 metros en formaciones geológicas estables. En la actualidad se están evaluando toda una serie de técnicas, descritas como Separación y Transmutación, que podrían reducir estos residuos en factores próximos a 100 en muchas de sus características, antes de depositarlos en el AGP.

El AGP, que es la pieza clave en esta estrategia es considerado, por toda la comunidad científica, una solución viable para el aislamiento de los residuos a muy largo plazo, reduciendo en todo momento (durante la vida del AGP de cientos de miles de años) los efectos (dosis) a las personas a niveles inferiores a los de la radiación ambiente natural. A pesar de estas evaluaciones todos los países encuentran importantes dificultades para seleccionar su emplazamiento. Finlandia, Estados Unidos y en menor medida Francia constituyen esperanzadoras excepciones a estas dificultades.

Futuro de la Energía Nuclear

La buena adaptación de la Energía Nuclear a los exigente criterios, como los de la UE, impuestos a las fuentes de energía y el incremento del coste de petróleo y gas están generando un renacimiento de la Energía Nuclear. Por este motivo, varios organismos internacionales prevén un incremento del uso de la Energía Nuclear de fisión (potencia instalada total) a medio y largo plazo.

Además, los estudios detallados y modelos de la Agencia Internacional de la Energía, Figura 6, en el World Energy Outlook 2006 [3], modelos del Instituto Internacional para Análisis Aplicados de Sistemas del Consejo Mundial de la Energía e incluso el IPCC (Panel intergubernamental del Cambio Climático 2007) [4], coinciden en que a corto y medio plazo (2030-2050) será necesario mantener o incrementar la potencia nuclear instalada para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero.



World Energy Outlook 2006 - THE ALTERNATIVE POLICY SCENARIO

Figura 6: Fracciones de energía producida por distintas fuentes de energía, según los distintos escenarios del World Energy Outlook 2006.

Evolución de la tecnología nuclear

La Energía Nuclear ha desarrollado su tecnología durante los últimos 40 años y se mantiene en continua fase de investigación y desarrollo con proyectos de I+D para nuevas generaciones de reactores y ciclos del combustible nuclear, que estarán disponibles en escalas de tiempo desde hoy mismo (Gen II y III) hasta los reactores de 2030 o 2050 (Gen IV y Transmutadores), Figura 7. Las principales objetivos para la mejora progresiva se orientan hacia los pilares de la sostenibilidad: Mejora de la seguridad, eficiencia y economía a corto plazo, todo lo anterior más la reducción de los residuos radiactivos de alta actividad a medio plazo, y todo lo anterior más conseguir el máximo aprovechamiento de recursos naturales (U, Th) a largo plazo.

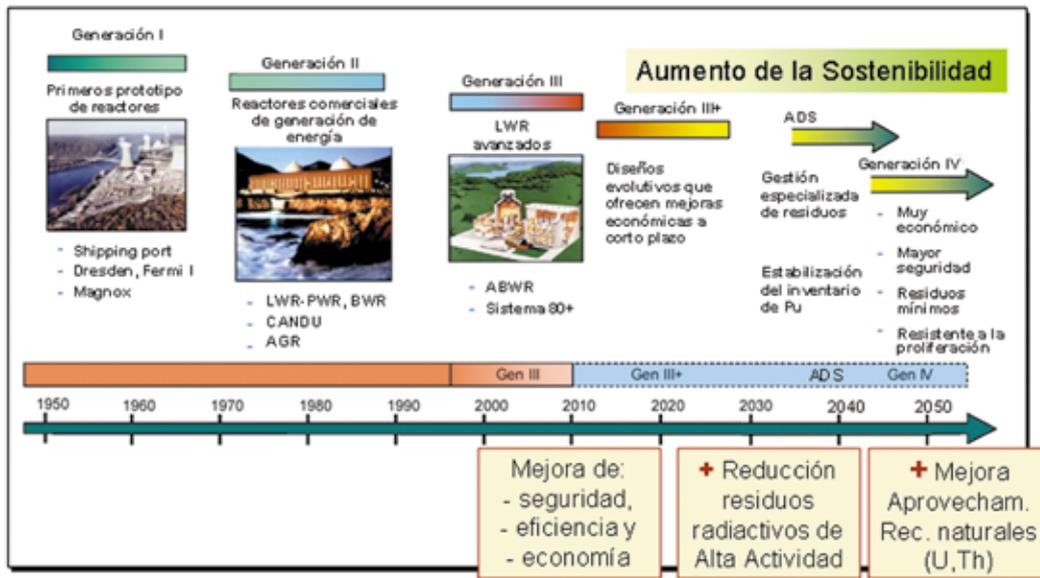


Figura 7: Esquema de evolución de las tecnologías nucleares y sus objetivos.

Desarrollos inmediatos de la Energía Nuclear

El coste de la Energía Nuclear se debe fundamentalmente a los costes directos e indirectos de la construcción de las centrales nucleares. Una vez amortizada la construcción, el coste de generación se reduce drásticamente. Por este motivo, los desarrollos en Energía Nuclear a corto plazo se orientan al máximo aprovechamiento de la riqueza que significan las centrales actualmente en operación.

El objetivo fundamental es la extensión del periodo inicialmente previsto para la operación de los reactores, es lo que se conoce como su "extensión de vida". Esta extensión requiere la validación de la seguridad de cada planta y sus materiales y la actualización de la instrumentación. El objetivo es conseguir añadir entre 10 y 20 años de operación. De paso, esta extensión reduce los residuos de desmantelamiento. Muy recientemente EEUU ha creado un precedente significativo al conceder esta extensión de 40 a 60 años a 48 de sus centrales nucleares.

Otro objetivo de desarrollo es el Uprating (o elevación) de potencia del reactor. Consiste en incrementar la potencia sobre la nominal, el factor de disponibilidad y/o la eficiencia térmica utilizando mejores tecnologías en la planta y en el combustible. Al mejorar la eficiencia, reduce ligeramente los residuos.

El tercer punto en desarrollo es el incremento del quemado del combustible. Consiste en mejorar el diseño y aumentar el enriquecimiento en ^{235}U del combustible para aumentar la energía extraída por unidad de masa. Este es un proceso progresivo y de los 33 GWd/THM iniciales se espera alcanzar los 45-50 GWd/THM e incluso en algunos reactores llegar a los 60 GWd/THM, El alto quemado, mejora el aprovechamiento del Uranio y reduce la producción de residuos de alta actividad.

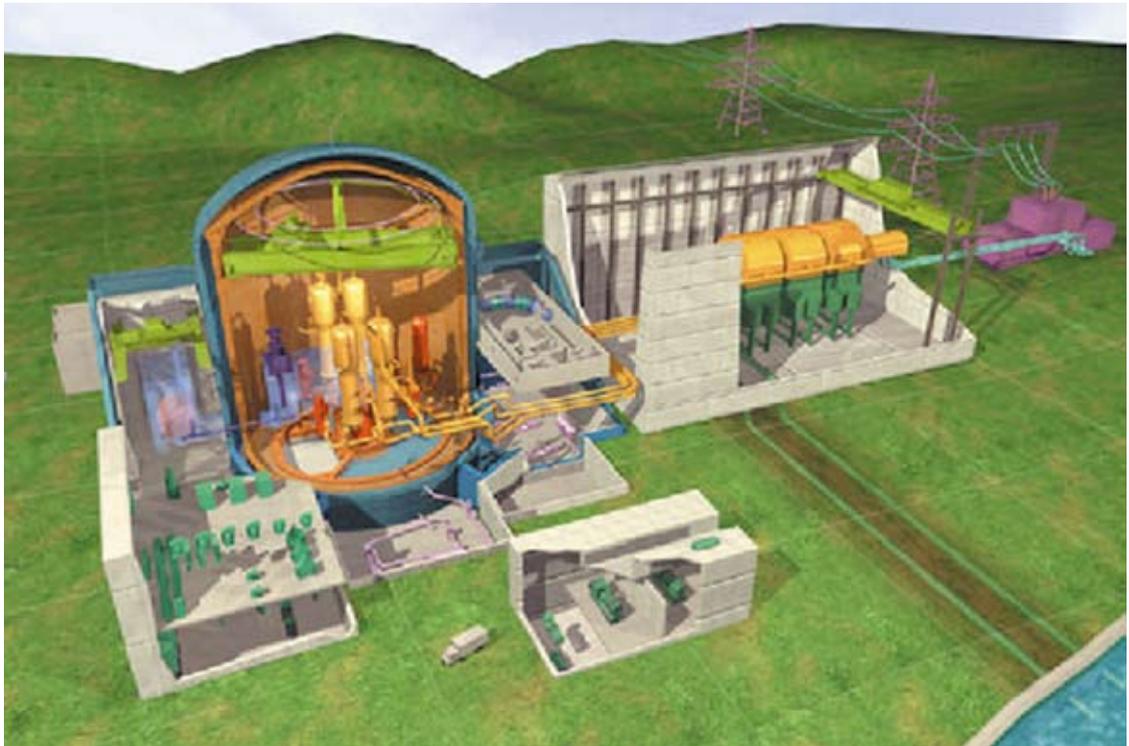


Figura 8: Esquema del reactor de tercera generación EPE (European Pressurized Reactor).

Junto a estos desarrollos aplicables a los reactores ya construidos, se observa que los nuevos propuestos pertenecen a las generaciones III (como el EPR, Figura 8, AP1000, ABWR) y III+ (como los HTR, GT-MHR, PBMR). Estos reactores, que se basan en la evolución de los diseños actuales sin cambios revolucionarios, están listos para ser licenciados o ya están prelicenciados. Las principales novedades son, primero el incremento de seguridad, recurriendo a técnicas de seguridad pasiva o de incremento de la redundancia para reducir el riesgo probabilista. En segundo lugar aparece la mejor utilización del Uranio, siendo capaces de aceptar grados de quemado, enriquecimiento en ^{235}U y contenidos de Plutonio muy superiores, e incluso alguno de ellos puede ser utilizado con combustible mixto de Uranio y Plutonio. Además la mayor parte de los diseños han conseguido mayor eficiencia térmica, menores costes de construcción y mantenimiento que repercuten en una generación reducida de residuos de alta actividad y vida larga y una

mayor competitividad económica. Los reactores de tipo HTR y similares presentan ventajas adicionales por la elevada temperatura del fluido de refrigeración, que puede ser utilizada, para implantar procesos eficaces de generación de H_2 . En Europa están programados dos EPR uno en Finlandia y otro Francia. Mientras tanto en Asia se están construyendo reactores avanzados de tipo ABWR y en EEUU hay propuestas para construir varios AP1000.

Desarrollos a medio plazo

El énfasis específico de los desarrollos a medio plazo está en la reducción de los residuos radiactivos de vida larga y alta actividad, RRAA. En la actualidad, los desarrollos en esta línea se centran en el concepto de Separación y Transmutación, SyT, y sus tecnologías. La SyT parte de reconocer que los RRAA contienen varios grupos de isótopos muy heterogéneos y que en el combustible irradiado todos comparten todos los problemas. Con SyT los distintos grupos de isótopos similares son Separados por procesos químicos y posteriormente se busca una solución específica a cada uno de ellos. El primer grupo es el del Uranio que puede ser reutilizado o almacenado de forma simple cerca de la superficie. Después están los materiales estructurales activados, que ocupan mucho volumen y tienen gran masa pero al no generar calor y tener una actividad específica baja también pueden ser gestionados con relativa facilidad.

El tercer grupo son los fragmentos de fisión de vida media y corta, los residuos inevitables de la fisión nuclear. Estos, por su corta vida media (<30 años), son terriblemente radiactivos y emiten mucho calor pero sólo durante un periodo limitado y basta con esperar a que se desintegren, "se enfrien", durante unos 100-200 años. Como hay una pequeña actividad residual de fragmentos de fisión de vida larga, después de su enfriamiento conviene almacenarlos en formaciones geológicas estables pero altamente compactados.

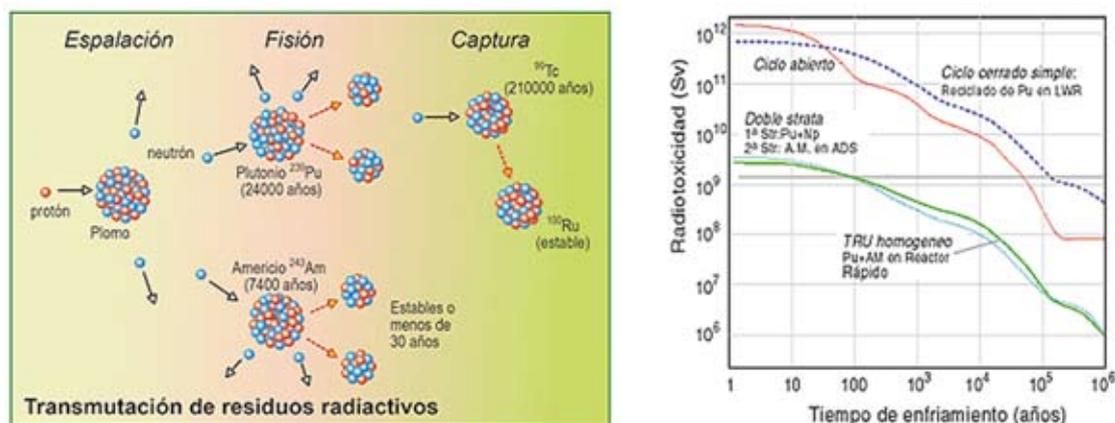


Figura 9: Esquema de los procesos físicos involucrados en la transmutación de residuos radiactivos. Radiotoxicidad de los residuos radiactivos de en distintos esquemas de transmutación

El último grupo lo constituyen los actínidos transuránicos, Plutonio, Neptunio, Americio, Curio, etc.. Estos son por una parte los mas peligrosos (altamente radiactivos, de interés proliferante y pueden afectar a la criticidad) y además tienen una duración enorme siendo casi igual de peligrosos durante

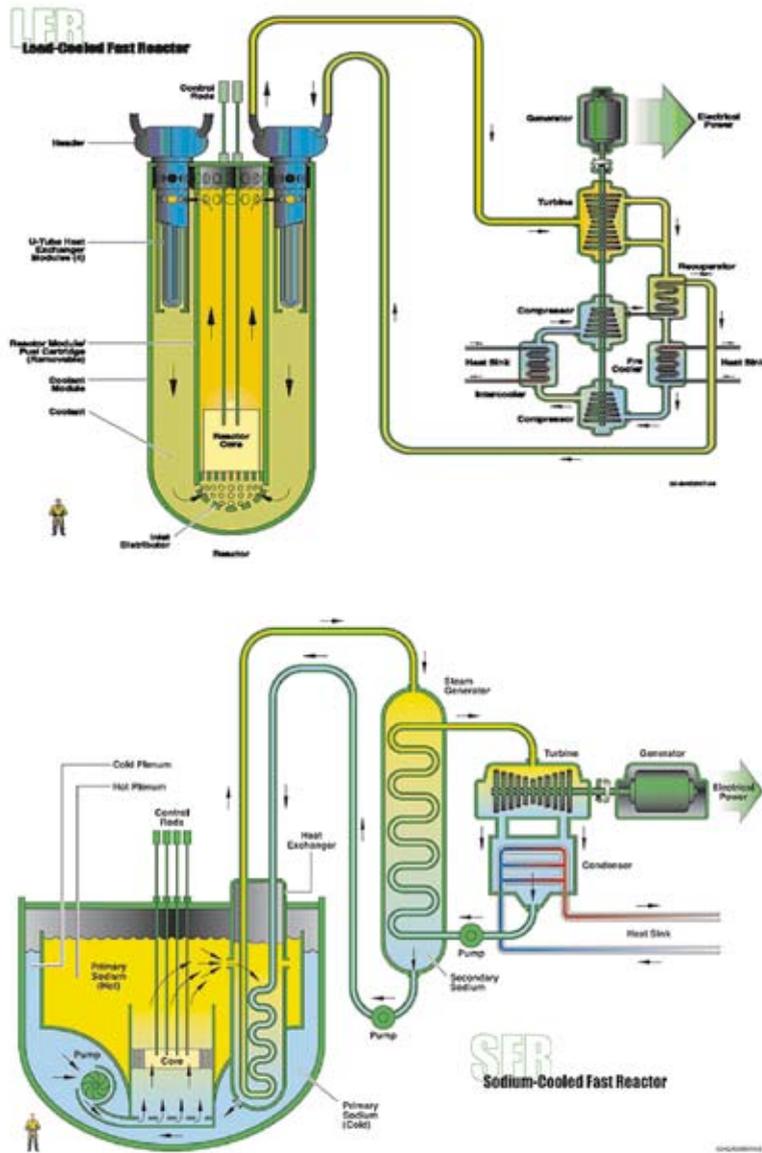


Figura 10: Esquema de los reactores rápidos de GEN-IV refrigerados por plomo y por sodio.

decenas a centenas de miles de años. Por otra parte, tienen el aspecto positivo y negativo de su alto contenido energético. La solución propuesta por SyT es su transmutación, Figura 9. Esta consiste en convertir estos residuos en un nuevo combustible nuclear y hacerlos desaparecer a la vez que generamos grandes cantidades de energía. En realidad no desaparecen sino que se convierten en residuos de los tipos anteriores. Los restos y pérdidas no transmutados deberán ser almacenados en formaciones geológicas estables.

Los estudios actualmente en curso [5][6] sobre la forma más eficaz de transmutar estos actínidos indican dos soluciones: la utilización de reactores rápidos o de unos nuevos dispositivos, conocidos como ADS, que resultan de la combinación de las tecnologías de aceleradores y reactores rápidos.

Estos mismos estudios nos indican que SyT reducirá el inventario, radiotoxicidad y volumen de los residuos de alta actividad en factores próximos a 1/100. Esto a su vez implica reducir el tiempo necesario para alcanzar cualquier nivel de referencia en el inventario de radiotoxicidad en un factor 1/100 – 1/1000, Figura 9, y eliminar el riesgo de proliferación del almacenamiento final. De forma adicional SyT permitirá reducir el volumen necesario para almacenar los residuos de alta actividad y posiblemente una simplificación del almacenamiento definitivo. Las cifras para las ventajas de SyT se resumen en una reducción del legado a largo plazo en masa de los residuos de alta actividad con un factor 1/20–1/1000, la radiotoxicidad por 1/100 y los materiales de posible uso militar por 1/100; la producción de más electricidad en un 30%, y el aumento de la capacidad de los almacenamientos finales en factores ente 5 y 50. Como SyT se basa en Tecnologías avanzadas potencialmente costosas y peligrosas necesita de un enorme esfuerzo de I+D+I para conseguir las ventajas sin costes inaceptables.

Desarrollos a largo plazo

Cuando hace unos años los países con gran uso de Energía Nuclear, se reunieron para preparar los reactores de la segunda mitad del siglo XXI, identificaron como objetivos la sostenibilidad a largo plazo y el uso de diseños revolucionarios. Esto dio lugar a la iniciativa para la cuarta generación o, Gen IV. Gen IV [7] selecciono seis tipos de reactores incluyendo: uno de agua supercrítica, otro de sales fundidas, un tercero de muy alta temperatura, optimizado para la producción de hidrógeno, pero su núcleo son 3 reactores rápidos. En todos los casos se impone la condición de seguridad intrínseca, y en lo posible pasiva, con reducción del accidente máximo desde el principio del diseño.

Gen IV incluye tres tipos de reactores rápidos: los refrigerado por metales líquidos (plomo fundido, y sodio fundido), Figura 10, y los refrigerado por Gas (He). Las características fundamentales de estos reactores rápidos son que permiten el máximo aprovechamiento de los recursos naturales, el Uranio y eventualmente el Torio, a la vez que reducen de forma importante los residuos radiactivos actínidos generados y además permiten mejorar la eficiencia termodinámica en la generación de electricidad. Las estimaciones de reservas de Uranio [8] indican que con los reactores actuales y a costes no muy distintos de los actuales hay Uranio para entre 60 y 200 años. Los reactores rápidos permiten mejorar el aprovechamiento de este Uranio en un factor próximo a 100 por lo que proporcionan una solución para la generación de electricidad para miles de años.

Además, estos reactores rápidos podrían ser utilizados como transmutadores para reducir significativamente los residuos ya generados.

Conclusiones

La Energía Nuclear proporciona el 20% de la electricidad en España y el 30% en la UE, de forma segura, económicamente competitiva, respetuosa con el medioambiente y sin emitir CO₂ ni otros gases de efecto invernadero, evitando agravar aún más el incumplimiento del protocolo de Kyoto.

La Energía Nuclear se adapta plenamente a las prioridades de la UE para sus necesidades y planes futuros de suministro de energía: garantía de suministro, competitividad económica y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La Energía Nuclear ha desarrollado su tecnología durante los últimos 40 años y está en continua fase de investigación y desarrollo con proyectos de I+D para nuevas generaciones que estarán disponibles en escalas de tiempo desde hoy mismo (Gen II y III) hasta los reactores de 2030 o 2050 (Transmutadores y Gen IV).

Las nuevas generaciones permitirán aumentar, aún más, la sostenibilidad de la Energía Nuclear: mejorando la seguridad, eficiencia y economía, reduciendo la cantidad de los residuos radiactivos de alta actividad y mejorando el aprovechamiento de los recursos naturales (U, Th) haciendo posible su utilización de forma masiva durante miles de años.

Referencias

Energía 2007, Foro Nuclear (2007).

IAEA- PRIS Power Reactor Information System Database. International Atomic Energy Agency. <http://www.iaea.org/programmes/a2/>

World Energy Outlook 2006. International Energy Agency (2006)

Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers. Formally approved at the 9th Session of Working Group III of the IPCC, Bangkok, Thailand • 30 April – 4 May 2007. IPCC (2007)

Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA 5990, Nuclear Energy Agency, OECD (2006)

Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, A Comparative Study. Nuclear Energy Agency, OECD (2002)

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. GIF-002-00. U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (2002)

“Libro Rojo”. Uranium 2005. Resources, Production and Demand Nuclear Energy Agency, OECD (2006).

CAPÍTULO 15

LA FUSIÓN COMO SOLUCIÓN: LOS DESAFÍOS

Francisco Castejón

*Laboratorio Nacional de Fusión
CIEMAT*

El problema energético

Se dan ya numerosos indicios que nos aconsejan abandonar paulatinamente nuestro actual modelo energético. El cambio climático y la escasez de recursos no renovables que, además, están concentrados en ciertas zonas del planeta, son los principales inconvenientes de nuestro actual modelo, aunque no son los únicos. La generación y el consumo de energía, basados en las actuales tecnologías, genera numerosos impactos ambientales que, en sí mismos, nos aconsejan ser prudentes en el uso de la energía y reducir éste a los niveles verdaderamente necesarios. Las lluvias ácidas, las mareas negras, la contaminación de las aguas por vertidos, la contaminación del aire por diferentes sustancias nocivas que salen de chimeneas y tubos de escape, la generación de residuos de alta radiactividad, son ejemplos de los efectos negativos que tiene nuestra actual forma de consumir y producir la energía.

Por si todo esto fuera poco, la situación económica del planeta es de una enorme desigualdad, pues un 20 % de la población tiene acceso a una gran parte de los recursos, conviviendo con situaciones de gran pobreza en otras zonas del planeta. Si, como es de justicia, pretendemos que toda la población mundial tenga acceso al mismo nivel de vida que disfrutamos en los países industrializados, la extensión del consumo haría que todos los problemas del presente modelo se volverían insostenibles. La ecuación se complica aún más si tenemos en cuenta que la población mundial puede aumentar en el futuro. Si bien es verdad que el ritmo de crecimiento de la población actual no es el que se había predicho en los 90¹, es también cierto que tenemos que vivir pensando que las generaciones futuras tienen derecho a alcanzar los

¹ En el año 1992, en torno a la Cumbre de Río, se decía que la población mundial se duplicaría en la década de los 90 alcanzando unos 10000 millones de habitantes en el 2000. Asimismo se pronosticaba que en 2025 la población podría haber alcanzado los 25000 millones de habitantes. Afortunadamente estos presagios no se han cumplido y en la actualidad, la población mundial no supera en mucho los 6000 millones de habitantes. Es claro que los mecanismos de regulación de la población son extremadamente complejos y no se puede tratar este asunto sólo considerando que la población se comporta como una fría progresión geométrica. Por ejemplo, se ha demostrado que el desarrollo y modernización contribuyen a disminuir el ritmo de crecimiento de la población.

mismos niveles de vida que nosotros, por lo que debemos preservar el planeta lo más posible y aspirar a desarrollar modos de vida y tecnologías que permitan disfrutar de nuestro planeta a poblaciones sensiblemente superiores a la actual.

Seguramente por todos estos motivos, se está abriendo paso un consenso en diversas instancias que van desde los científicos a los políticos, pasando por actores diversos de la sociedad, de que nuestro modelo energético actual debe ser sustituido por otro que esté libre de los impactos ambientales y sociales que nuestra actual forma de consumir energía conlleva.

El nuevo paradigma energético debe servir para que toda la población mundial alcance niveles de vida razonables (aunque este término de "razonable" requiere de mucho debate para una definición más precisa) y esto se haga causando los menos daños posibles al medio ambiente. En particular y de forma prioritaria, las fuentes de energía futura han de estar libres de las emisiones contaminantes que dan lugar al cambio climático y, además, han de ser virtualmente inagotables.

Por otra parte, está claro que han pasado los tiempos en que vivíamos como si los recursos fueran inagotables y el tamaño de la tierra fuera infinito y se pudieran depositar en ella todas las sustancias contaminantes que deseáramos sin preocuparnos de los cambios que esta actitud iba a desencadenar en el medio. Los efectos de nuestras acciones vuelven y nos afectan.² Tomar nota de este sencillo hecho invita a cambiar de formas de vida y a consumir lo menos posible. Sin embargo, esta acción de "tomar nota" se ha revelado como algo muy difícil para nuestra teoría económica. Asimismo aparece como un gran desafío para nuestras costumbres y formas de vida.

Las fuentes de energía renovables,³ que proceden en última instancia del sol, cumplen bien con el cometido de proporcionar energía con impactos asumibles por la sociedad y, además, están bien distribuidas en el mundo, con lo que es indudable que deben usarse al máximo de sus posibilidades. Los modelos de generación distribuida de electricidad son muy prometedores, sobre todo teniendo en cuenta que las tecnologías de control permiten la combinación de la generación distribuida con el enganche a la red de transporte de electricidad. Sin embargo persiste la duda de si producirán los profundos cambios sociales, técnicos y económicos necesarios para su extensión a gran escala a corto tiempo. Es imprescindible, por tanto, continuar con la investigación en otras tecnologías energéticas distintas de las renovables, así como en técnicas de remediación de impactos.

Es en este marco en que se producen las actividades de investigación para conseguir la fusión controlada, la que podría ser una fuente de energía con impactos ambientales admisibles y virtualmente inagotable.

Qué es la fusión

Las reacciones de fusión termonuclear consisten en unir núcleos ligeros para producir núcleos más pesados, con el consiguiente desprendimiento de energía que se produce por el defecto de masa. Estas reacciones han sido las artífices de toda la gama de elementos que conocemos hoy en día y de ellas

² Un interesante ensayo sobre como sufrimos los efectos de nuestro consumo se puede ver en U. Beck, "La sociedad del mundo global" Ed. Siglo XXI.

³ Las fuentes renovables disponibles hoy serían aquellas que proceden en última instancia del sol: la energía hidráulica que viene siendo extensamente utilizada, la eólica que ya aporta muchos kWh al sistema eléctrico español, la solar fotovoltaica para producir electricidad de forma distribuida, la solar térmica de baja temperatura para proveer de calefacción y agua caliente sanitaria, la solar térmica de alta temperatura para producir electricidad y la biomasa en forma de biocombustibles líquidos o de combustibles sólidos. Además de estas fuentes solares, cabe tener en cuenta la energía geotérmica que, aunque no sea propiamente renovable, tiene un inmenso potencial, y la procedente de las olas y de las mareas.

extraen su energía las estrellas. Así pues las estrellas son grandes hornos de fusión donde se fabrican los elementos que, por ejemplo, nos permiten existir a nosotros y nuestro planeta.

Para que la fusión pueda ser usada de forma controlada como fuente de energía, hay que domesticar estas reacciones y producirlas en la tierra. Sin embargo las cargas positivas de los dos núcleos que se han de fusionar tienden a hacer que se repelan. La forma de vencer estas fuerzas de repulsión y así conseguir que los núcleos se fusionen es comunicar energía suficiente a los núcleos. La energía necesaria es del orden de las decenas de kiloelectronvoltios (keV), que traducido a temperatura nos da cientos de millones de grados⁴.

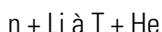
De todas las reacciones de fusión posibles en la naturaleza, las más accesibles son aquéllas cuyas secciones eficaces sean grandes a temperaturas no demasiado altas. En concreto, la más asequible es la que tiene lugar entre dos de los isótopos del hidrógeno, como se muestra a continuación:



Un núcleo de deuterio, compuesto por 1 neutrón y un protón, se fusiona con uno de tritio, formado por un protón y dos neutrones. Los productos de la reacción son un núcleo de helio, que se compone de dos protones y dos neutrones, que sale despedido con una energía de 3,4 MeV, y un neutrón con una energía de 14,1 MeV⁵.

La sección eficaz de esta reacción deja de ser despreciable, es decir, esta reacción empieza a ser posible, a temperaturas de más de cien millones de grados. A estas temperaturas la materia está en estado de plasma, un estado físico con propiedades muy distintas de los usuales en la tierra: sólido, líquido y gaseoso. Decimos que la materia está en estado de plasma cuando los electrones están separados de los núcleos y tenemos fluido gas de partículas cargadas pero cuya carga neta es cero. A pesar de que los plasmas prácticamente no se estudian como tales en las universidades españolas, constituyen el estado más abundante del universo, puesto que el 99 % de la materia no oscura está en estado de plasma.

El tritio es un elemento débilmente radiactivo (es un emisor beta con una vida media de 12 años) no existe en la tierra en la naturaleza y, por tanto habrá que fabricarlo en el propio reactor. Para ello se usan un par de reacciones nucleares en las que interviene el litio. La primera de ellas termaliza los neutrones mientras que la segunda fabrica el tritio:



Es decir, el tritio se fabrica a partir del litio y el reactor consumirá finalmente deuterio y litio.

Como se ha dicho, las propiedades de los plasmas son muy distintas de las de los otros estados de la materia. Se caracterizan por ser buenos conductores del calor y de la electricidad, por ser inestables y por tener comportamientos colectivos. El estudio de los plasmas y la comprensión de sus comportamientos es clave para conseguir la fusión comercial, puesto que la rentabilidad de la reacción depende, lógicamente, de que el plasma esté bien confinado y tanto la energía que se produce en las reacciones de fusión como la que se inyecta desde el exterior permanezcan en el interior del plasma el mayor tiempo posible. Esto es un verdadero desafío científico, puesto que los plasmas tienden más bien a deshacerse de la energía que les sobra de forma bastante rápida (se ha dicho ya que son inestables y buenos conductores).

⁴ 1 keV es la energía que posee un electrón al someterlo a un potencial de un kilovoltio. En el equilibrio térmico, la energía media de un electrón sería la equivalente a una temperatura de 11200 °K. En física del plasma se habla indistintamente de energías y temperaturas, lo cual es sin duda un cierto abuso de lenguaje puesto que no cabe hablar de temperatura si no hay equilibrio térmico.

⁵ 1 MeV es un megaelectronvoltio, es decir, un millón de electronvoltios.

Es obvio que no hay ningún recipiente que pueda confinar el plasma a unas temperaturas tan elevadas. Por un lado, el propio recipiente se fundiría por la interacción con un fluido tan caliente y, por otro, el plasma se diluiría en las impurezas que se generaran en la interacción con las paredes del recipiente. Se hace imprescindible, por tanto, separar el plasma de la pared y existen dos estrategias para tal fin, el Confinamiento Inercial, del que casi no se hablará en este trabajo, y el Confinamiento Magnético.

La Fusión por Confinamiento Inercial consiste en bombardear pequeños (de unos pocos milímetros de diámetro) blancos sólidos de deuterio y tritio con láseres muy potentes. Debido a la energía proporcionada por el láser, estos blancos implosionan y generan en su interior condiciones de alta presión y temperatura. En el corazón del blanco, tras la implosión, se produce un plasma extraordinariamente denso y se alcanzan las temperaturas necesarias para conseguir la fusión. En la actualidad, todavía se han de mejorar las técnicas de ignición y la potencia de los láseres para alcanzar la fusión inercial rentable.

La otra estrategia es la conocida como Fusión por confinamiento Magnético. En esta línea de trabajo se aprovecha el hecho de que las partículas del plasma están cargadas y sienten los campos magnéticos. Así pues, se generan trampas magnéticas donde se confinan las partículas del plasma, evitando así que toquen las paredes del recipiente. Esta segunda estrategia se encuentra en la actualidad más cerca de conseguir la fusión que la primera citada.

Para que el proceso de fusión sea rentable, teniendo en cuenta ya todas las pérdidas y la eficiencia de conversión del necesario ciclo térmico se ha de tener confinado un plasma lo bastante caliente, con una densidad lo bastante alta y durante suficiente tiempo. De forma numérica se dice que se ha de cumplir el criterio de Lawson:

$$n \times T \times \tau > 10^{22} \text{ m}^{-3} \times \text{K} \times \text{s}$$

Donde n es el número de partículas por metro cúbico, T es la temperatura en grados Kelvin y τ el tiempo de confinamiento de la energía en segundos. En estos momentos este triple producto alcanza valores en el tokamak JET un factor 5 por debajo de lo necesario. A lo largo de la historia de la investigación en Fusión, este triple producto se ha multiplicado por un factor 5,000.000 y cada década lo hace por un factor 1000. En la figura 1 se puede apreciar el avance del triple producto a lo largo del tiempo.

Se han probado numerosos modelos de trampas magnéticas desde que empiezan las investigaciones sobre fusión por confinamiento magnético, allá por los años 40. Espejos magnéticos lineales y tipo pelota de "base-ball", "pinches"⁶ de plasma toroidales, coloidales y de campo invertido, etc. Tras todas estas pruebas, han prevalecido dos conceptos como los más eficaces para confinar los plasmas: el tokamak,⁷ y el estelarador.⁸ La diferencia principal entre los tokamaks y los estelaradores es que por los primeros circula una corriente muy intensa por el plasma, mientras que por los segundos no circula o, si lo hace, la corriente es muy débil. En ambos dispositivos, la clave del confinamiento es que las líneas de campo magnético tenga forma helicoidal.

⁶ Los "pinches", palabra inglesa que se podría traducir por "apretadores" o "sujetadores" son una familia de dispositivos por confinamiento magnético en los que se genera un campo magnético que se modifica a lo largo de la descarga de plasma y tienden a constreñirlo. En algunos de ellos, el propio plasma crea parte del campo magnético necesario para el confinamiento.

⁷ El tokamak fue inventado por Artsimovich a mediados de los 60, y la palabra es el acrónimo de las palabras rusas cámara toroidal de corriente.

⁸ El estelarador es la traducción introducida en este trabajo de la palabra inglesa stellarator, es decir, fabricante de estrellas. Fue inventado por Spitzer en 1957.

El tokamak es un dispositivo de confinamiento magnético muy ingenioso con forma de rosquilla. En él el campo magnético es creado en parte por un conjunto de bobinas magnéticas planas en forma de D y también circulares y en parte por la propia corriente que circula por el plasma, reduciendo así el coste de operación. El ingenio del tokamak radica en que esta misma corriente es capaz de calentar el plasma hasta elevadas temperaturas por efecto Joule, es decir por la resistencia que opone el propio plasma. Dado que el plasma es un buen conductor de la electricidad, y lo es tanto más cuanto más caliente está, las temperaturas que se pueden alcanzar están limitadas, por lo que es necesario disponer de sistemas auxiliares de calentamiento de plasmas. En la figura 2 se puede ver una representación esquemática de un tokamak.

Puesto que por el plasma confinado en un estelarador no circula corriente, todo el campo magnético se crea mediante bobinas externas. En estos dispositivos la parte helicoidal del campo magnético hay que crearla toda ella por medios externos por lo que las bobinas son mucho más complicadas que en los tokamaks. En particular, en los estelaradores de última generación, las bobinas son alabeadas, lo que añade dificultades para su diseño y construcción. En la Figura 3 se puede ver una imagen esquemática del estelarador Wendelstein 7-X, con bobinas superconductoras, que se está construyendo en el norte de Alemania.

Los tokamaks han alcanzado parámetros de plasma mucho más cercanos a los necesarios para la fusión comercial que los que se tiene en estelaradores. Sin embargo, la opción por estos últimos dispositivos sigue abierta, puesto que los tokamaks presentan algunas desventajas intrínsecas a su diseño que ya están resueltas en estelaradores. La corriente que circula por el plasma de los tokamaks es ventajosa en el sentido que nos ahorra parte del campo magnético y de la potencia auxiliar de calentamiento. Sin embargo puede causar algunas inestabilidades que, de no controlarse, se extienden rápidamente a todo el volumen del tokamak, lo que motiva que el confinamiento se pierda bruscamente y que del plasma se vaya contra las paredes y deposite allí su gran energía. A este proceso se le llama disrupción y, afortunadamente, se puede predecir bastante bien cuando va a producirse. Por otra parte, la corriente que circula por el plasma, que se induce mediante un efecto transformador, sólo se puede mantener durante un tiempo limitado, tras el cual es necesario reiniciar la operación, por lo que el tokamak es inherentemente pulsado. Dado que no circula corriente por sus plasmas, los estelaradores están libres de estos problemas: no pueden sufrir disrupciones y permiten un funcionamiento continuo. Como se ha dicho, pesar de estas indudables ventajas, el confinamiento del plasma en estos dispositivos es de peor calidad. Es necesario esperar a la nueva generación de estelaradores optimizados para mejorar el confinamiento en estos dispositivos.

El papel del Iter

Otro parámetro clave en los reactores de fusión es Q , el cociente entre la potencia generada por la fusión y la inyectada para mantener el plasma caliente. La fusión se ha alcanzado ya de forma controlada en el tokamak TFTR, en EE.UU., donde se consiguieron valores de $Q = 0,4$ (11 MW de potencia) durante 0,5 segundos o, más recientemente, en el tokamak europeo JET, que se encuentra en Inglaterra y es el más grande del mundo, donde se han conseguido valores de $Q = 0,2$ (16 MW de potencia) durante 2 s y de $Q = 0,6$ (4 MW de potencia) durante 5 s. Estos tokamaks no tienen el tamaño ni el campo magnético suficientes para conseguir parámetros de fusión más parecidos a los que deben darse en un reactor, por lo que es necesario dar un paso más y construir dispositivos más grandes.

El ITER (Internacional Tokamak Experimental Reactor) es el futuro gran experimento de fusión termonuclear por confinamiento magnético, donde se demostrará la rentabilidad comercial de la fusión y

la viabilidad tecnológica. Será, como indican sus siglas, de tipo tokamak, a pesar de los inconvenientes que se vio que tienen estos dispositivos. Como también se dijo anteriormente, los tokamaks poseen en la actualidad mejores propiedades de confinamiento, gracias a las cuales consiguen mejores parámetros del plasma.

El objetivo del ITER es que el cociente entre la potencias producida y la inyectada, llamado Q en el argot de los científicos de fusión, sea de un valor igual a 10, lo cual demostraría la viabilidad científica, tecnológica así como la rentabilidad de la fusión. El objetivo es producir 500 Megawatios de potencia durante periodos de 500 segundos. La potencia total auxiliar que como se ha visto es imprescindible, ascenderá a un máximo de 73 Megawatios. La Figura 4 muestra un esquema del tokamak ITER. Inicialmente se aspiraba a conseguir Q igual a infinito, es decir, a que la reacción de fusión se mantuviera sin aporte exterior de energía, pero en la actualidad se cree más bien que es mejor disponer de un botón de control sobre la reacción, que sería la potencia de calentamiento auxiliar.

La construcción del ITER es un gran experimento de fusión, pero también lo es desde el punto de vista de la cooperación científica y técnica internacional. En él participan siete socios: La Unión Europea, Japón, Rusia, China, Estados Unidos, Korea del Sur e India, con sistemas científicos y técnicos muy diversos, por lo que los desafíos organizativos son de primer orden. Su construcción ha empezado ya en Cadarache, una pequeña localidad en el sur de Francia no lejos de Aix-en-Provence. De todos los socios, el más fuerte en cuanto a aportación científica y económica es la Unión Europea, que costeará el 40% del proyecto y es el líder mundial en cuanto a desarrollos tecnológicos y científicos. El acuerdo que se negoció entre representantes de todos los países socios contemplaba la distribución de costes en las tres fases del proyecto: construcción (4.570 millones desde 2006 a 2016), operación y desmantelamiento, que sumarán en total 10.300 millones de euros. Se espera que el ITER entre en funcionamiento en 2017.

Uno de los elementos fundamentales que se probará en el ITER es el manto fértil, una pieza que se encuentra fuera de la vasija y que sirve para producir tritio, usando la reacción nuclear citada anteriormente. Existen varios diseños de manto fértil y se irán probando todos ellos para ver cual es el que mejores resultados produce. En los futuros reactores el manto fértil es la pieza donde se recoge la energía de los neutrones y se extrae mediante un intercambiador de calor. En la figura 5 se puede observar el esquema de un reactor con sus principales componentes. El concepto de reactor que se maneja para el futuro contempla que el plasma se mantenga con la energía de las reacciones de fusión. En efecto, el núcleo de helio que se forma está cargado, por lo que sentirá el efecto de los campos magnéticos y permanecerá dentro del plasma depositando su energía en él. Los neutrones, por el contrario, escapan y será la energía que portan la que se utilizará para producir electricidad. Finalmente, según el presente diseño, la electricidad se generará mediante un ciclo térmico. Sin embargo, en su actual diseño, el ITER no producirá electricidad de forma comercial.

Además de los conceptos de manto fértil, se probarán los tres principales sistemas de calentamiento que serán de utilidad en reactores comerciales, algunos de los cuales son muy novedosos y todavía requieren de posteriores desarrollos. Se probarán también nuevos sistemas de control, de adquisición y almacenamiento de datos.

El ITER es un proyecto de grandes dimensiones. El edificio que contiene el tokamak tendrá una altura total de 30 metros y una anchura de 40, y la vasija tendrá un radio mayor de 6,2 metros y un radio menor de 2 m, lo que supondrá un diámetro de 20 metros de diámetro y 5.400 toneladas de peso. Las bobinas del ITER serán superconductoras y constan de varios sistemas: En torno a la vasija, con forma de rosquilla, habrá 18 bobinas con forma de D que crean el campo acimutal, que miden 14 m de altura y 9 m de ancho.

En la parte interior, siguiendo el eje del toro, habrá un solenoide central de 12 m de altura. Este sistema de bobinas creará un campo magnético de 5,3 tesla y ha de estar dentro de un criostato a temperaturas de -276 grados para mantener el material en estado superconductor. En total, el volumen del plasma confinado será de 837 m³, diez veces mayor que el volumen del JET. Por el plasma del ITER circulará una corriente de 15 MA, cuatro veces la que circula en el JET.

En el interior de la vasija del ITER es clave el conjunto de piezas llamado divertor, integrado por 54 módulos de 12 toneladas, que se encargará de concentrar la interacción del plasma con la pared de la vasija. El divertor es un elemento de la vasija del reactor donde se concentra la mayor parte del flujo de calor y partículas del plasma que se escapa del campo magnético confinante. El campo magnético está diseñado para que los flujos más intensos se dirijan hacia este elemento del tokamak. Todo el reactor estará rodeado de una estructura de hormigón que actúa de blindaje biológico.

Los resultados científico y tecnológicos del ITER serán la clave para demostrar la viabilidad de la fusión como una alternativa energética para el siglo XXI.

Los problemas abiertos

Existen todavía algunos problemas abiertos que justifican el que todavía se realicen investigaciones sobre la fusión. Las líneas de investigación sobre las que trabajar se pueden encontrar tanto en el campo de la Física del Plasma como en las tecnologías del reactor.

Los plasmas son sistemas con muy esquivos que presentan a menudo comportamientos colectivos, en que las inestabilidades se propagan a la velocidad de la luz e inmediatamente se pueden extender a todo el plasma. El control de las inestabilidades y, por tanto, la mejora de las propiedades de su confinamiento permitirá realizar reactores más pequeños y manejables y, por tanto, más baratos. La mejora del confinamiento implica también reducir el transporte de partículas y energía en los plasmas lo cual, a su vez, implica el buen conocimiento de fenómenos como la turbulencia o los efectos de la enorme potencia de calentamiento sobre el confinamiento. Las investigaciones sobre estos temas requieren de una gran potencia de computación, pues estos problemas sólo pueden resolverse con la ayuda de los ordenadores más potentes del mundo. Piénsese que si ya es difícil entender la turbulencia en un gas neutro, mucho más difícil lo será entenderla en un plasma con partículas cargadas sometidas a intensos campos magnéticos.

Además del conocimiento de los plasmas y de sus propiedades de confinamiento, se hace imprescindible el desarrollo de la Ciencia de los Materiales, clave en los futuros reactores de fusión, puesto que dichos materiales han de soportar condiciones extremas de radiactividad y de flujo de calor.

Dado que el confinamiento no es perfecto, la primera pared de la vasija que sufre el flujo del plasma y de los neutrones, habrá de ser especialmente resistente. El flujo típico de potencia que tendrá que sufrir es de aproximadamente 1 MW por metro cuadrado. Y todavía sufrirá condiciones más críticas el divertor, donde será un orden de magnitud mayor el flujo de potencia y de partículas.

Además de la resistencia a estos grandes flujos de potencia, los materiales de que estén hechas las placas del divertor y la pared de la vasija, han de tener un buen comportamiento desde el punto de vista radiológico. Es decir, además de ser muy resistentes, han de soportar bien el baño de neutrones sin que se produzcan productos radiactivos que tarden más de 100 años en convertirse en inocuos. Se trata de que baste para su gestión las tecnologías que ya se han desarrollado para tratar los residuos de media y baja actividad.

Otro elemento clave en la gestión ambiental del reactor será el inventario del tritio, uno de los componentes radiactivos que intervienen en la reacción. Hay que garantizar que los metales que se empleen han de ser capaces de liberar el tritio capturado (los isótopos del hidrógeno se almacenan fácilmente en grandes cantidades en las superficies metálicas) con tratamientos apropiados. Esto se debe a que los materiales han de ser inocuos en el momento en que se desmantele el reactor y para ello ha de ser posible extraer el tritio. También hay que buscar materiales transparentes a la luz y a las microondas que sigan siéndolo aún en las difíciles condiciones del reactor.

Viendo todos estos problemas planteados, además de la Física del Plasma, la ciencia de los materiales es clave para conseguir que un reactor de fusión funcione apropiadamente. Con este fin, además de realizar cálculos teóricos en superordenadores, se está diseñando una instalación donde los materiales estarán sometidos a condiciones de irradiación similares a las que se darán en el ITER. Se trata de la Instalación IFMIF (Internacional Fusion Material Irradiation Facility, o Instalación Internacional para la Irradiación de Materiales de Fusión). Básicamente, IFMIF constará de un acelerador de deuterones que se harán chocar sobre una capa de litio líquido, de tal manera que se producirán neutrones de la misma energía que los de fusión. Al final de la línea se colocará una celda con muestras de diferentes materiales. En la actualidad no existe en la tierra ninguna fuente de neutrones que los produzca con un espectro similar al que tendrán los neutrones de fusión, por lo que no se puede estar seguro del comportamiento de los materiales en un reactor.

Entre las instalaciones IFMIF e ITER se espera solucionar los problemas abiertos en fusión y despejar así el camino hacia la construcción del DEMO, el primer reactor comercial de fusión, que será un dispositivo de demostración. Si la línea de desarrollo de los estelaradores avanza deprisa, es posible que, se base DEMO en el concepto tokamak o estelarador, los futuros reactores de fusión sean estelaradores.

El programa de fusión español

En España, los trabajos en Fusión radican en el Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT, que ha puesto en marcha el estelarador TJ-II, representado en la Figura 5, y que está participando en numerosas tareas particulares para construir ITER. A pesar de que éste es un tokamak, existen numerosos aspectos de la física del plasma comunes para tokamaks y estelaradores, de tal forma que la experiencia adquirida en el TJ-II es válida para ITER. En particular, se realizan estudios del transporte turbulento y de la acción de los campos eléctricos sobre el plasma, así como de los efectos sobre el confinamiento de diferentes topologías magnéticas, todos ellos de utilidad para el ITER. Asimismo se realizan estudios de materiales y de la interacción entre el plasma y la pared de utilidad para los futuros reactores de fusión.

La aventura de la Fusión en España empieza en el CIEMAT a principio de los 80, con la entrada en funcionamiento del pequeño tokamak TJ-I, que sirvió para formar un grupo de dos decenas de científicos pioneros en este campo. Cuando en 1986 España entra en la Comunidad Europea, el CIEMAT establece un laboratorio asociado de EURATOM y propone la construcción del estelarador de tamaño medio TJ-II, que entró en funcionamiento en 1988. En la foto xxx se puede observar el estado actual del TJ-II. Durante el tiempo de diseño detallado del TJ-II se construyó en el CIEMAT un pequeño torskatrón, el TJ-IU, que hoy en día continua en funcionamiento en la Universidad de Stuttgart (Alemania).

El TJ-II tuvo un presupuesto de 30 millones de euros, de los que el 45% fue financiado por fondos del programa de investigación de la Unión Europea (distintos de los fondos de cohesión o estructurales).

El CIEMAT ha sido a lo largo de su participación en la investigación en fusión muy consciente de la doble misión del proyecto: promover una fuente de energía a medio plazo, mediante el TJ-II y la participación en proyectos internacionales, y simultáneamente, a mas corto plazo, facilitar la penetración de la industria española en un programa internacional de alto contenido tecnológico. Los resultados son por ahora alentadores: el 60% de la construcción del TJ-II lo realizaron empresas españolas, y posteriormente estas empresas han ganado contratos en proyectos europeos de fusión por un valor similar al del coste del propio TJ-II. ITER ofrecerá sin duda nuevas oportunidades.

En el mismo sentido, la experiencia ganada en el programa de fusión permitió a España competir a nivel europeo por la sede de ITER. La calidad de la candidatura de Vandellós (Tarragona) como posible emplazamiento permitió pasar con éxito todos los exámenes técnicos. Al final el acuerdo político dio el emplazamiento a Francia, pero España consiguió la sede de la agencia gestora europea, que manejará un presupuesto cercano a los 2000 millones de euros y está situada en Barcelona.

Además, en el CIEMAT existe también un grupo que trabaja en materiales para la fusión que ha estudiado los efectos de la irradiación en diferentes materiales. Este grupo está participando en los diseños de IFMIF.

Los investigadores del Laboratorio Nacional de Fusión están disseminando las actividades de investigación sobre este tema en España a través de colaboraciones diversas con otros grupos de investigación, tanto experimentales como teóricos. En este último campo, se llevan ya varios años usando técnicas de computación en "grid" (distribuida).

El papel de la fusión y la escala temporal

Quizá el principal problema de la fusión es que todavía no está disponible de forma comercial. Por tanto, esta técnica no puede aportar todavía kWh a la red y sus impulsores no pueden hacerla valer como una alternativa en el presente. Esta fuente de energía sólo podrá contribuir a solucionar los problemas energéticos cuando sea una tecnología estándar, es decir, cuando los reactores de fusión estén disponibles.

Aunque en el corto plazo, en el actual proceso de reconversión del modelo energético, la fusión no puede jugar ningún papel, sí cabe diseñar un modelo futuro donde exista un nicho de producción de energía en horas valle y por grandes centrales de fusión conectadas a la red. Este sería un buen complemento de otras fuentes que no estuvieran siempre disponibles o que produjeran energía mediante generación distribuida como las renovables. La generación distribuida, un concepto francamente prometedor podría estar bien complementada por la fusión.

Como se ha visto anteriormente no se puede decir que la energía de fusión sea totalmente limpia. Generará residuos radiactivos de media y baja actividad y sus instalaciones contendrán tritio, un elemento débilmente radiactivo, pero las plantas de fusión están libres de la generación de los peligrosos y engorrosos residuos de alta actividad. Desde el punto de vista de la seguridad, hay que decir que las plantas de fusión serán inherentemente seguras y en el supuesto de accidente más grave no sería necesario evacuar a la población. Por tanto, las afecciones al medio ambiente generadas por la fusión pueden ser perfectamente aceptables para la sociedad, puesto que los beneficios que esta fuente de energía podría aportar en el futuro los compensarán con creces.

La investigación en fusión tiene sentido, desde luego, si se piensa que puede ser necesaria en el futuro. Los grandes recursos tanto humanos como económicos que cuesta esta investigación se justifican bajo esa óptica. Independientemente de que el éxito de estos trabajos esté garantizado o no.

El problema para considerar la fusión como una solución al problema del cambio climático hoy en día es pues la escala temporal en que estará disponible. Como se ha visto, la investigación en fusión tiene por delante varios desafíos científico-técnicos en forma de problemas a resolver. Muchos de ellos se espera que queden despejados con la operación del ITER y otros se pueden atacar con instalaciones satélites. En particular y como un desafío mayor está el que los estelaradores alcancen unos parámetros del plasma que sean relevantes para el reactor.

Se trata de ganar tiempo en los presentes lustros mediante el ahorro y la eficiencia energética y mediante la extensión de las tecnologías energéticas limpias disponibles hasta que la humanidad tenga disponibles una serie de tecnologías energéticas que la libren de los problemas actuales. En particular podemos pensar en un panorama gobernado por la fusión, que produciría energía de forma intensiva y electricidad en horas valle, y las renovables, que serán un buen complemento a la aportación procedente de esta fuente de energía.

¿De qué escala temporal hablamos? Cuando se habla de desarrollos futuros es necesario siempre ser precavido, porque no podemos saber las sorpresas que nos depararán las tecnologías futuras, en forma de avances, o los disgustos que nos darán, en forma de limitaciones y dificultades que hoy no se intuyen. Sin embargo sí podemos hacer un pequeño ejercicio especulativo. ITER producirá su primer plasma en 2016 y, durante su operación, se irán aprendiendo las técnicas diversas,. Incluida la operación con tritio y las pruebas de los diferentes diseños de manto fértil. También se ganará experiencia en la resistencia de los materiales y en materiales superconductores de alta temperatura, que posibilitarían disminuir sensiblemente los costes del reactor.

Además, las investigaciones en fusión y los desarrollos tecnológicos que las acompañan, son un motor de primer orden para el avance tecnológico en numerosos y diversos campos, puesto que la fusión moviliza prácticamente todas las tecnologías. Estos desarrollos tendrán un gran impacto sobre otros aspectos de nuestras industrias y nuestras vidas. En particular, el desarrollo de nuevos materiales, las tecnologías de la superconductividad, la computación, las tecnologías de microondas, la electrónica de potencia, etc., se están beneficiando ya de las actividades de investigación y desarrollo en el campo de la fusión.

Antes de que ITER deje de funcionar, se han de extraer de él los conocimientos necesarios para proceder al diseño de DEMO, el reactor de fusión de demostración, que ya producirá electricidad. DEMO podría empezar a funcionar en 2030, de forma realista y en él se terminarán de desarrollar los sistemas de reactor, de tal forma que la construcción de forma masiva de los reactores de fusión comerciales podría empezar a mediados de la década de los 30. Como he dicho anteriormente, el problema del cambio climático plantea desafíos más urgentes y nos obligará a tomar medidas de transición que, en el fondo, implican una mayor austeridad y la extensión de una nueva cultura del uso de la energía. La fusión, las renovables y una serie de tecnologías de apoyo como, por ejemplo, las relacionadas con el hidrógeno como vector energético o las dedicadas al almacenamiento energético, posibilitarían la construcción de un nuevo modelo energético libre de los graves problemas que tiene nuestras presentes tecnologías energéticas.

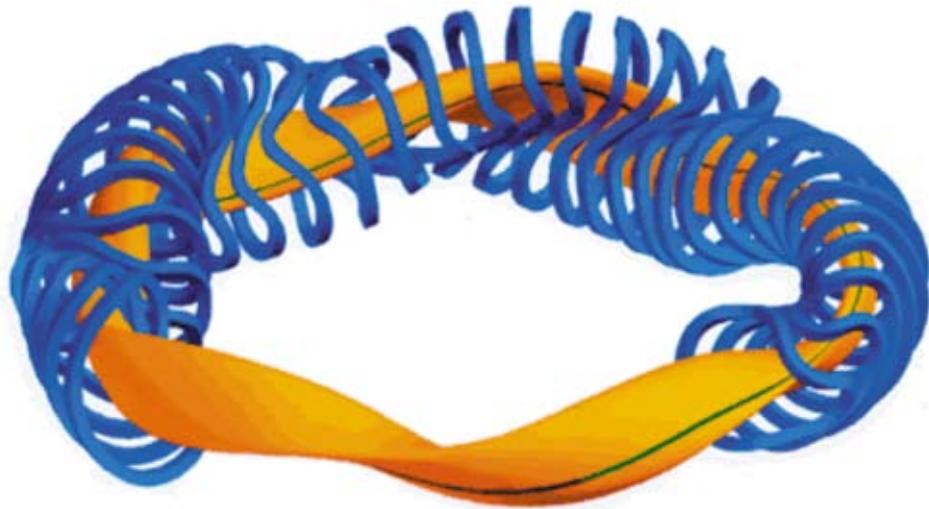


Figura 3: Vista del estelarador W7-X (con bobinas alabeadas superconductoras, que aparecen en azul y con el plasma representado en amarillo), que se construirá en Greifswald (Alemania).

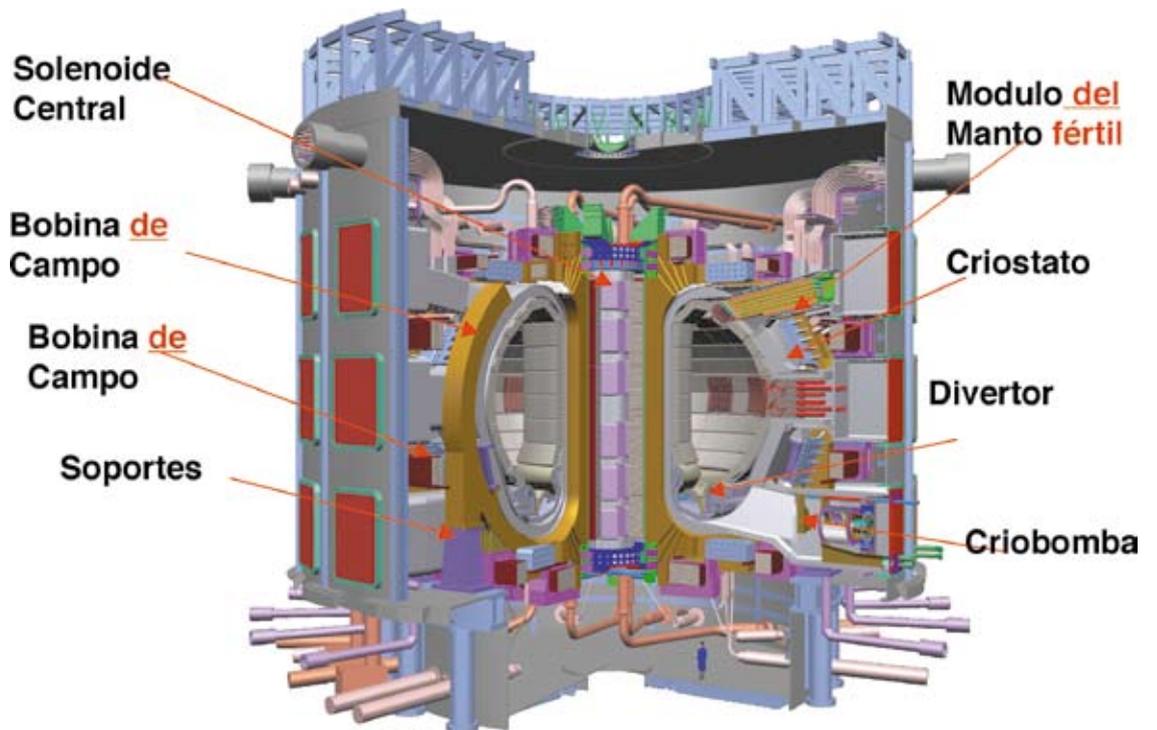


Figura 4: Principales componentes del tokamak ITER.

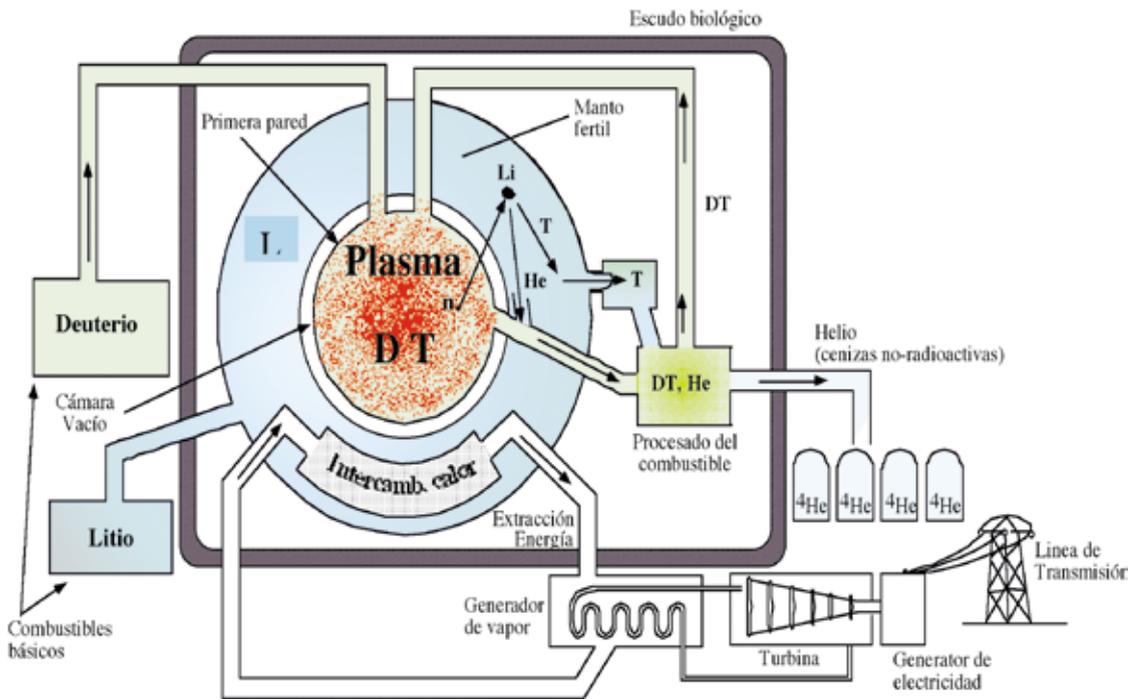


Figura 5 Esquema de un reactor de fusión, donde se han indicado sus principales elementos.

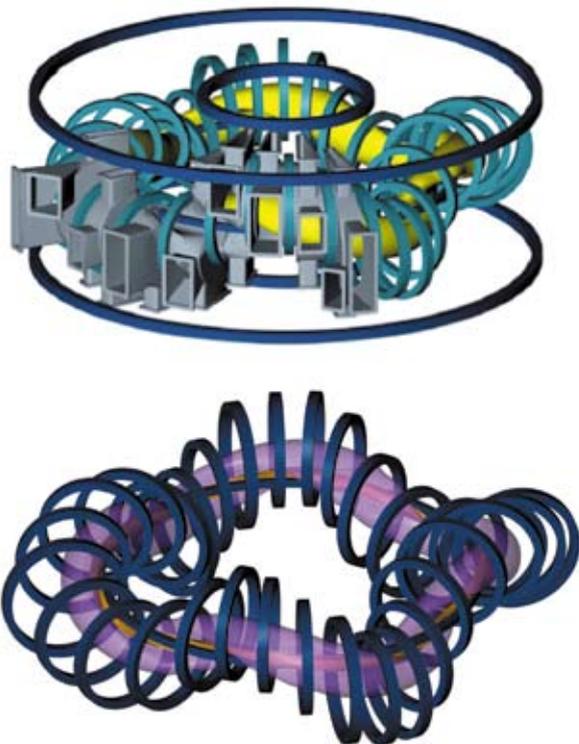


Figura 6: Vista esquemática del estelarador TJ-II, en funcionamiento en el CIEMAT desde 1997. El plasma está en amarillo, la vasija en gris y las bobinas en azul. También se puede apreciar sin la cámara de vacío con el plasma en morado y las bobinas en azul y naranja.

CAPÍTULO 16

LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA PARA LA DIFUSIÓN Y COMERCIALIZACION DEL USO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Rubén Hevia González

Gerente en Gijón de Soliclima

Mi nombre es Rubén Hevia González, tengo 23 años y hace aproximadamente un año que cree mi empresa dedicada al sector de las energías renovables y la eficiencia energética. Dicha empresa no tendría lugar sin el apoyo económico y moral de mis padres.

A lo largo de todo este año he adquirido conocimientos a nivel técnico-comercial de todos los productos que trabajo, tengo una amplia gama de productos que abarcan ampliamente el sector al que me dirijo.

Comercializamos e instalamos calderas de alto rendimiento de gasóleo, gas y biomasa últimamente muy demandadas, debido a la entrada en vigor del nuevo Código Técnico de la Edificación. También trabajamos la energía solar térmica tanto para uso domestico como industrial, desarrollamos todos los pasos para la instalación de nuestros productos, desde la comercialización, hasta la instalación final y legalización en los organismos competentes. Desarrollamos sistemas autónomos para viviendas aisladas con el empleo de la energía solar fotovoltaica, eólica o mini hidráulica.

Somos partícipes de grandes ahorros energéticos en la climatización de piscinas tanto exteriores como interiores, mediante la utilización de varios tipos de captadores solares especiales para este uso, como bombas de calor altamente eficientes para que nuestros clientes puedan sacar el máximo rendimiento a sus instalaciones. Trabajamos un sistema de calefacción mucho mas eficiente y sana que la de nuestros competidores, la calefacción por suelo radiante hidráulico que consigue un ahorro de energía de un 20 % mas que la calefacción convencional al trabajar con una temperatura mas baja de 40 ° en vez de la tradicional por radiadores que necesita temperatura del agua mayor de 60° , además es la única calefacción recomendada por la Organización Mundial de la Salud. Nuestra empresa también se dedica a la comercialización e instalación de equipos para el reciclado de aguas grises y pluviales que proporcionan un ahorro en los consumos de agua, también he de decir que este tipo de aprovechamiento de un recurso natural no es muy aceptado en nuestra comunidad autónoma del Principado de Asturias ya que parece que

aquí el agua no va a faltar nunca, sin embargo este tipo de producto tienen bastante más aceptación en lugares donde el índice de precipitaciones es más bajo, e incluso existen restricciones y penalizaciones por un consumo desmedido del agua.

Después de esta pequeña presentación de los productos que trabajamos en Rubén Hevia S.L (SOLICLIMA GIJÓN) me gustaría plasmar en este escrito que la mayoría de los conocimientos que a día de hoy tengo han sido logrados a mi capacidad autodidacta y a la ayuda que me ha sido prestada especialmente por mi padre.

La experiencia que me ha dado este año de trabajo intenso me dice que todavía queda mucho por hacer para que exista una concienciación social del problema que tratamos. El agotamiento de los pozos de petróleo y de muchos de los combustibles que habitualmente estamos acostumbrados a derrochar, así como el crecimiento de nuevas potencias de orden mundial como China o la India, que de hoy a pocos años, comenzaran a demandar unos niveles de combustible similares a los de Estados Unidos, da paso a una nueva época en la que es necesario que todos nos abrochemos el cinturón y comencemos a consumir de una forma bastante más moderada de la que estábamos acostumbrados en el pasado siglo XX, debemos de aprovechar todos los recursos naturales y prácticamente infinitos que nos brinda hoy en día el conocimiento de la tecnología que tenemos y desarrollar sistemas energéticos basados en el sector de las energías renovables y la eficiencia energética.

El cambio climático y el oscurecimiento global a día de hoy son ya realidades que por mucho que nos esforcemos en esquivar, van a estar ahí. Lo que muchos años atrás nadie le dio importancia, hoy en día sí la tiene y en nuestras manos está evitar una catástrofe a nivel global.

Desde mi punto de vista creo que nuestro país tiene un gran potencial en el desarrollo de energías renovables debido a que estamos en muy buena situación para el establecimiento de estas.

Para empezar disfrutamos de más de 3900 kilómetros de costas en las que se podría desarrollar ampliamente tanto la energía mareomotriz como la energía eólica. Tenemos grandes extensiones de terreno sometidas a una gran radiación, caldo de cultivo propicio para el sector de la energía fotovoltaica. También tenemos un número elevadísimo de parcelas que se dedican a plantar cultivos que ya no son rentables pero que sin embargo se siguen plantando debido a que dichos cultivos están subvencionados por la Comunidad Económica Europea, todos estos cultivos podrían ser remplazados por cultivos energéticos.

Intento comprender que los cambios que yo puedo estimar como óptimos no son realizables debido a la inercia de todas las actividades industriales, económicas y de impacto social, pero no obstante debemos tener en cuenta, que debemos ir pensando en cambiar esta tendencia.

Desde mi actividad empresarial (en ciernes todavía) tengo la completa seguridad que con el tiempo, más bien pronto que tarde, la conciencia de las personas llevará a un uso más racional y respetuoso con el medio en el que nos encontramos, en lo que al uso de las diferentes energías, se refiere.

CAPÍTULO 17

ENERGESIS INGENIERÍA S.L. UNA SPIN-OFF DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA PARA EL IMPULSO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN CLIMATIZACIÓN

Pedro Fernández de Córdoba Castellá

Doctor en Física. Doctor en Matemáticas.

Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valencia.

Socio Fundador de Energesis Ingeniería.

Universidad Politécnica de Valencia.

Introducción

Energesis Ingeniería S.L. [1] nace en forma de una *spin-off* de la Universidad Politécnica de Valencia con la vocación de canalizar empresarial y socialmente las posibilidades de la tecnología desarrollada en el proyecto de investigación *Geocool* [2] y de orientar y potenciar el surgimiento de nuevas líneas y productos energéticos. Es una empresa ubicada en la Ciudad Politécnica de la Innovación [3], en la Universidad Politécnica de Valencia, lo que le proporciona una plataforma excelente para mantenerse en contacto con la investigación científica y las novedades tecnológicas.

Energesis nace en un momento en el que la sensibilidad ante los problemas asociados al reto energético crece de manera espectacular en nuestra sociedad. De entre los factores desencadenantes podríamos citar varios: la carestía del petróleo frente a un incremento de la demanda, la insostenibilidad medioambiental de nuestro modelo energético y la ausencia de alternativas claras. En la Unión Europea, por ejemplo, el consumo energético aumenta cada año, dependiendo cada vez más del abastecimiento de petróleo y gas natural que se tiene que importar de otros países. Los compromisos europeos frente al Protocolo de Kyoto para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a un nivel un 8% inferior a los niveles de 1990, de aquí al próximo diciembre de 2008, exigen por el contrario reducir el consumo de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).

En el año 2000, la Comisión Europea aprobó el Libro Verde “Hacia una estrategia europea de seguridad en el abastecimiento energético” COM 2000 769-final, en el que se establecen las estrategias a seguir para disminuir la dependencia energética exterior. Las principales son:

- Incrementar el uso de las fuentes de energía renovables
- Disminuir el consumo energético fomentando las buenas prácticas y la eficiencia energética

Las posibilidades de ahorro energético en el sector de la edificación son especialmente significativas. Energesis nace como una iniciativa para promover el uso de tecnologías innovadoras que promuevan el ahorro en nuestros edificios.

En este marco, Energesis centra su actividad en el campo de la ingeniería de sistemas de climatización geotérmica completándola con otros servicios relacionados y relativos a la mejora de la eficiencia energética en la edificación. El producto principal de la empresa es el diseño y ejecución de sistemas de climatización mediante bombas de calor geotérmicas (“llave en mano”), para lo que ha desarrollado un proceso de diseño innovador y personalizado para el cálculo e implantación garantizando así la respuesta óptima en cada caso. Además, y anticipándose a las necesidades del mercado, Energesis Ingeniería oferta sus servicios como consultora en certificación energética de edificios, certificado obligatorio en los edificios de nueva construcción a partir de septiembre de 2007, según el R.D. 47/2007, con el objetivo de asesorar a arquitectos, constructores, promotores, etc. para que sus edificios cumplan con esta nueva legislación de eficiencia energética.

En definitiva, Energesis ofrece un sistema de climatización de edificios (viviendas, oficinas, naves industriales, etc.) basado en el intercambio de calor con el suelo cuyas principales ventajas son:

- El ahorro energético medio del 50% en comparación con sistemas de climatización convencionales.
- Emisiones de CO₂ en torno del 50% de los sistemas tradicionales.
- Un mantenimiento más barato.
- Mejora de la estética en la edificación al suprimir las unidades de fachada.
- Disminución del ruido.
- Eliminación del riesgo de legionella al sustituir las torres de refrigeración.
- Posibilita el acceso a subvenciones por tratarse de una energía renovable [4].
- Es una tecnología aplicable tanto instalaciones de obra nueva como a viviendas ya existentes (sustitución de los sistemas de climatización usuales por los geotérmicos).

Además Energesis se propone introducir otros productos y servicios, resultado de las líneas de investigación que desarrolla dentro del campo de la energía, en:

- Integración con otras tecnologías de climatización de tipo convencional y también en aquellas basadas en otras energías renovables.
- Diseño de la instalación de climatización interior como producto complementario.
- Mantenimiento y extensión de garantías.

- Sistemas domóticos para el control de la eficiencia de los sistemas.
- Monitorización de las instalaciones.
- Estudios de calificación energética

Además, la base tecnológica de la empresa [5] y su capacidad científico-técnica [6,7] ha motivado que desde su creación haya desarrollado proyectos de I+D+i tanto de forma autónoma como en asociación con otras empresas o instituciones (Instituto de Tecnología Eléctrica (ITE), Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO), Instituto de Ingeniería Energética). Entre estos proyectos cabe destacar el desarrollo de tres soluciones del programa GESTA (Generación de soluciones de tecnología avanzada), subvencionado por IMPIVA (Generalitat Valenciana) en su convocatoria de 2006, y el desarrollo en la actualidad de otras dos soluciones de este programa en la convocatoria vigente del 2007.

Trayectoria empresarial

Energesis nació a finales de 2004 de la mano de dos socios fundadores, Javier Urchueguía y Pedro Fernández de Córdoba, ambos profesores de la Universidad Politécnica de Valencia. En su gestación colaboró de manera determinante el Instituto para la Creación y Desarrollo de Empresas - Programa IDEAS [8] apoyando la generación del plan de empresa y dando asesoramiento en las fases iniciales.

En su estrategia empresarial, Energesis ha apostado por mantener altos estándares de calidad, tanto en su organización interna como en los proyectos desarrollados. Ello queda patente, por ejemplo, en la rápida obtención de las certificaciones ISO 9001 e ISO 14001, la presencia mayoritaria de ingenieros con titulación superior y la fuerte vinculación con los grupos de investigación de origen en la Universidad Politécnica de Valencia.

Otra de las actividades impulsadas con especial énfasis desde la dirección de la empresa es la realización de acciones de divulgación de una tecnología que ha permanecido completamente desconocida en nuestro entorno [9-14]

En cuanto a la evolución de la empresa en el mercado, en las siguientes gráficas se muestra la evolución del número de ofertas realizadas, el número de clientes de la empresa desde su creación hasta la actualidad y las distintas características de los mismos. Como se puede observar, en estos primeros años predominan los clientes particulares, ya que su capacidad de toma de decisiones es más rápida y los proyectos de ejecución de sus instalaciones se realizan a corto plazo (instalaciones en viviendas). No obstante las empresas y, en particular las empresas constructoras, representan un porcentaje nada despreciable. Hay que remarcar que los contratos con constructoras han sido promovidos por instituciones públicas, en concreto ayuntamientos, que han apostado por la inclusión de la tecnología de bomba de calor geotérmica en sus edificios.

Por último, cabe remarcar que los clientes más técnicos, centros tecnológicos e ingenierías, no han contratado los servicios de Energesis para la ejecución de sistemas de climatización geotérmica, sino que han solicitado la asistencia técnica especializada como, por ejemplo, medidas de conductividad térmica del suelo.

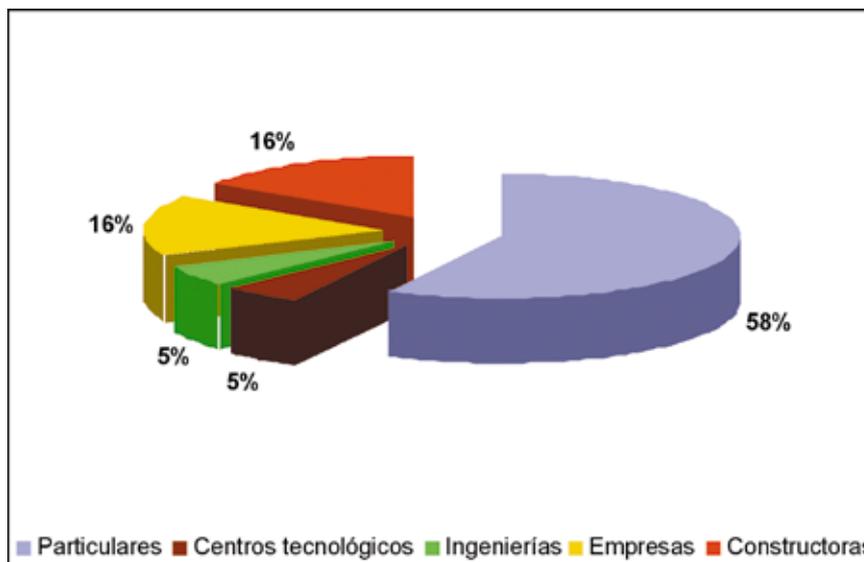
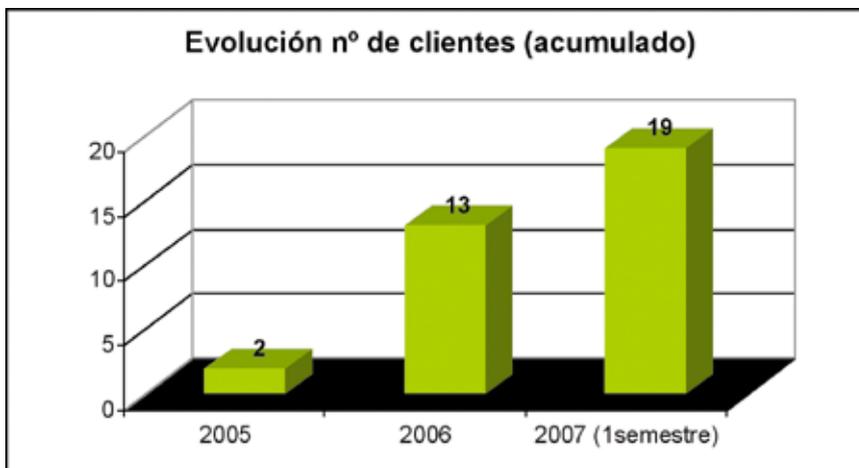
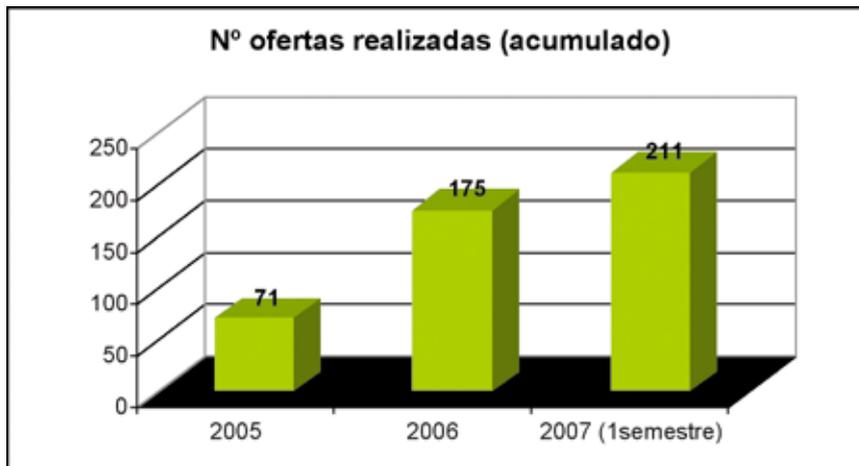


Figura 1.- Evolución y tipología de clientes de Energesis Ingeniería S.L.

En las siguientes gráficas, se puede ver el despegue de la empresa en el año 2006, así como las buenas perspectivas para el año en curso y el siguiente.

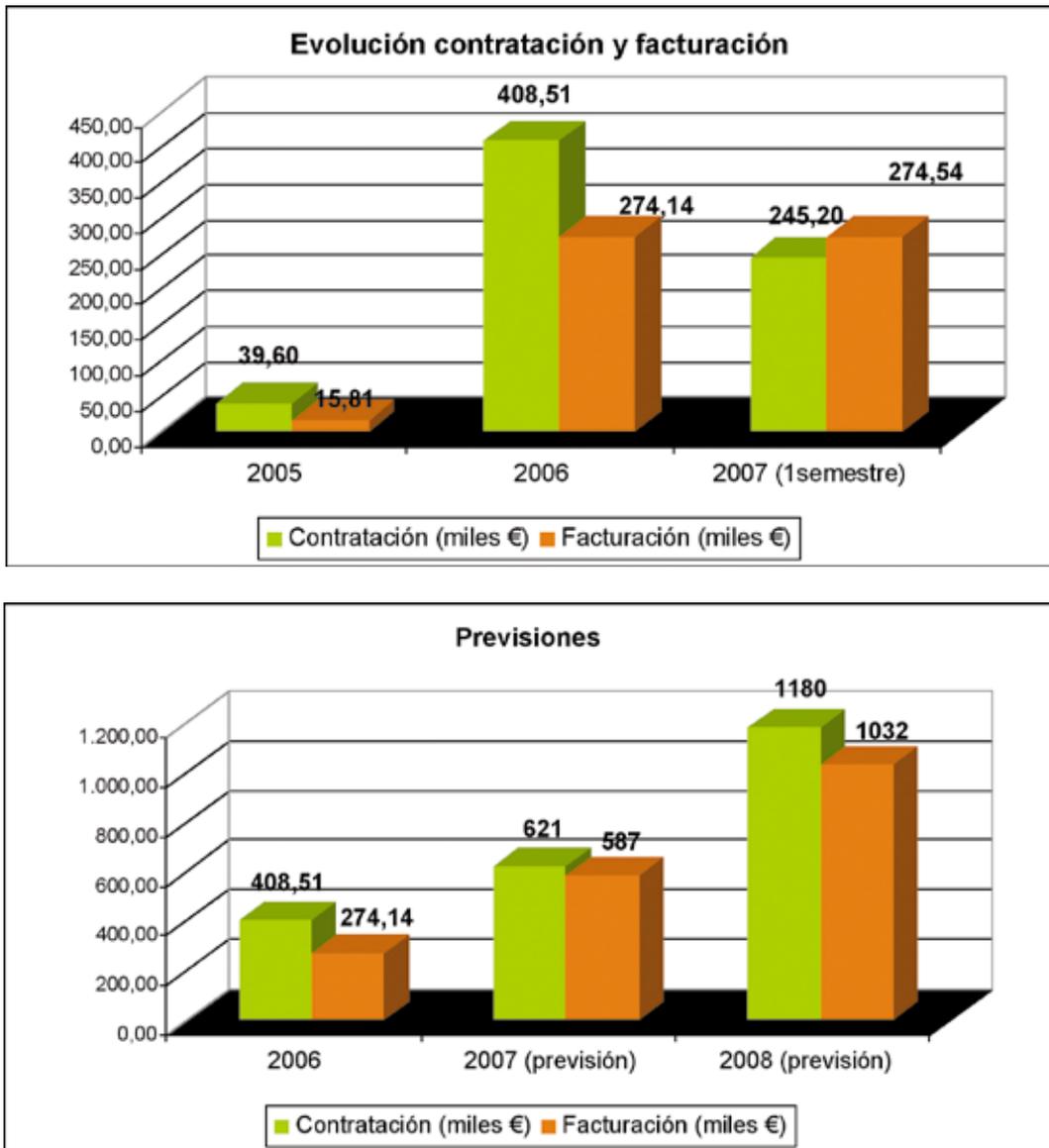


Figura 2.- Evolución y previsiones de la contratación y facturación de Energesis Ingeniería S.L.

En cuanto a los canales de entrada de Energesis en el mercado, hay que destacar que agentes importantes de la comercialización del producto son las empresas a las que la implantación de sistemas geotérmicos supone un nuevo nicho de mercado o una herramienta de eficiencia energética. Así, Energesis Ingeniería tiene convenios de colaboración con empresas energéticas como Unión Fenosa, empresas del sector de la geotecnia como Rodio o fabricantes de equipos de climatización como CIATESA, el mayor fabricante nacional de equipos de climatización.

Algunos proyectos destacados

En lo que sigue, y sólo como muestra de la actividad desarrollada por Energesis, presentamos algunos de los proyectos llevados a cabo:

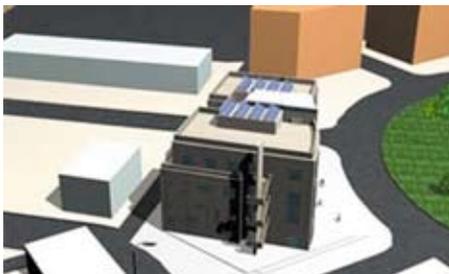
Ambulatorio de Oliva (Valencia)

Implantación de un sistema de 35 kW para calefacción y refrigeración de la zona de urgencias del ambulatorio. El intercambiador enterrado está instalado bajo el suelo del sótano, por lo que se empleó la tipología *slinky* (tubería enterrada en zanjas en forma de espiral).



Edificio de Oficinas en Gandia (Valencia)

Proyecto de un sistema híbrido que proporciona la demanda de calefacción y refrigeración al nuevo edificio de la sede de la empresa Azimutel S.A. El sistema de climatización está compuesto por bombas de calor de refrigerante variable conectadas al intercambiador enterrado y a un sistema de apoyo basado en la presencia de aerogeneradores capaces de absorber excesos de demanda energética y que permite reducir al mínimo la longitud de las tuberías enterradas. La potencia total instalada es de 180 kW.



Vivienda unifamiliar de carácter singular

Vivienda unifamiliar aislada situada en el municipio de Suances (Cantabria) de 1.200 m² climatizados mediante 10 perforaciones verticales de 150 metros de profundidad. El sistema proporciona calefacción, refrigeración, ACS y calentamiento de piscinas interior y exterior.

Conclusiones

Energesis representa un ejemplo real de transferencia de conocimiento desde la investigación universitaria al mundo empresarial, manteniendo como señas de identidad el rigor y el saber hacer característicos de la investigación de excelencia. La sinergia universidad-empresa ha sido decisiva en el desarrollo de nuestro proyecto empresarial. Las tendencias de mercado y el posicionamiento de liderazgo de Energesis permiten augurar un buen futuro para la propia empresa y, en definitiva, un despegue de una tecnología renovable y respetuosa medioambientalmente como es la climatización geotérmica en nuestro país.

Referencias

<http://www.energesis.es>

<http://www.geocool.net>

<http://www.cpi.upv.es>

<http://www.aven.es/ayudas/renovables.html>

Contribución de J. Urchueguía en este mismo documento.

J. F. Urchueguía, M. Zacarés, J. M. Corberán, Á. Montero, J. Martos, H. Witte

Comparative energy performance between a geothermal heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast

Enviado a *Energy, Conversion and Management*

D. Skuratov, Yu.L. Ratis, I. Selezneva, J. Pérez, P. Fernández de Córdoba, J.F. Urchueguía

Mathematical modelling and analytical solution for workpiece temperature in grinding

Applied Mathematical Modelling 31 (2007) 1039–1047

<http://www.upv.es/entidades/IDEAS/index.html>

Expansión. “El suelo como fuente de frío y calor”. 26 de Marzo de 2007.

El País, “*El sistema de refrigeración y calefacción geotérmicas se abre paso en España*”. 28 de marzo de 2007.

El Mundo, “*La UPV crea un sistema refrigerante que ahorra un 50% de electricidad*”. 20 de agosto de 2005.

Conferencia “*Climatización Geotérmica*” a cargo de Javier Urchueguía y Pedro Fernández de Córdoba en el Auditorio Santiago Grisolía del Museu de les Ciències Príncepe Felipe. Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia. 5 de marzo de 2007.

Conferencia “Un Sistema de Intercambio de Calor en Edificios” a cargo de Javier Urchueguía y Pedro Fernández de Córdoba en la *Cátedra Juan Caramuel* de la Universidad de Alcalá de Henares. 16 de noviembre de 2005.

Conferencia “*La Climatización Geotérmica. Una Alternativa Renovable para la Refrigeración y Calefacción de Edificios*” a cargo de Javier Urchueguía y Pedro Fernández de Córdoba en el Colegio Oficial de Arquitectos de la Comunidad Valenciana. 1 de febrero de 2006.

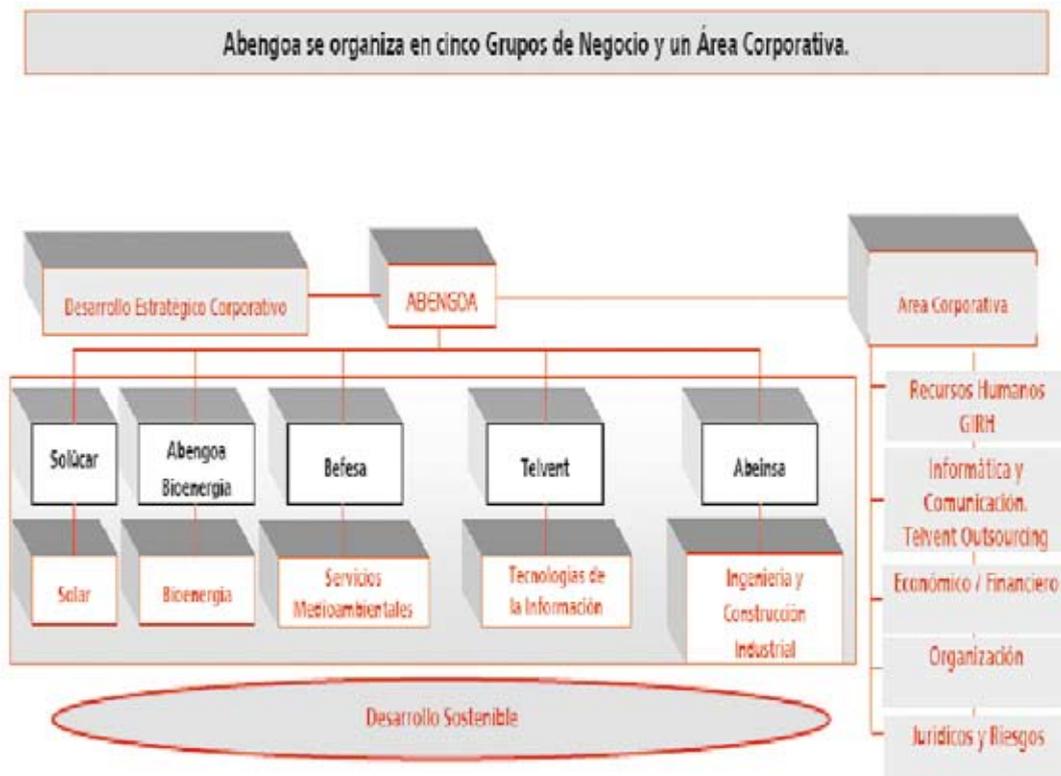
CAPÍTULO 18

ABENGOA BIOENERGÍA

José Antonio Moreno

Secretario General Técnico Abengoa

Abengoa es una empresa tecnológica que aplica soluciones innovadoras para el desarrollo sostenible en los sectores de infraestructuras, medio ambiente y energía.



El desarrollo estratégico de Abengoa se fundamenta en la generación de opciones de futuro necesarias para un mundo sostenible.

Como resultado de dicha estrategia Abengoa ofrece hoy una combinación de actividades que representan una mayor diversificación en mercados, cartera de clientes, y que refuerza sus capacidades frente a lo que constituía su negocio original de Ingeniería.

Evolución 1996 - 2006

Negocio	Compañía de Ingeniería		5 Grupos de Negocio	
	1996		2006	
	Ventas %	Flujos Brutos %	Ventas %	Flujos Brutos %
- Solar	-	-	-	-
- Bioenergía	-	-	18	17
- Servicios Medioambientales	8	8	21	20
- Tecnologías de la Información	24	14	17	15
- Ingeniería y Construcción Industrial	68	78	44	48

Ventas y Flujos Brutos en 2006 de 2.677,2 y 287,9 millones de euros respectivamente. Presente en más de 70 países.

Entre sus grupos de negocio se encuentra el de Bioenergía. Abengoa Bioenergía es una sociedad que se dedica a la producción y desarrollo de biocarburantes para el transporte, entre otros bioetanol y biodiesel, que utilizan la biomasa como materia prima (cereales, biomasa celulósica, semillas oleaginosas). Abengoa Bioenergía es uno de los líderes mundiales en la producción de biocombustibles, con un conjunto de activos localizados en los mercados más importantes (Europa y Estados Unidos) y es a su vez líder en el I+DT aplicado a este campo.

Los biocarburantes se usan en la producción de ETBE (aditivo de las gasolinas), o en mezclas directas con gasolina o gasoil. En su calidad de fuentes de energías renovables, los biocarburantes disminuyen la emisión de CO₂ y contribuyen a la seguridad y diversificación del abastecimiento energético, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles usados en automoción y colaborando en el cumplimiento del Protocolo de Kyoto.

Evolución de Abengoa Bioenergía

En 1995 Abengoa identifica la necesidad de una energía renovable para el sector del transporte.

Entre 1996 y 2001 se produce la construcción de las plantas con más capacidad de Europa y la adquisición de High Plains Corporation en USA.

Durante 2002 y 2003, se produjeron las adjudicaciones de sendas ayudas en I+D de la Comisión Europea (4'5 MM\$) y DOE de Estados Unidos (35'5 MM\$). Tiene lugar la construcción de la tercera planta en España y se producen las primeras ventas de etanol desde España a diversos países de la Unión Europea.

En 2004 y 2005 se crea una sociedad conjunta con Cepsa (Total) para la planta de ETBE. Se produce además la expansión de las plantas en Estados Unidos de York, NE y Colwich, KS. El volumen de contratos de exportaciones de etanol a Europa asciende a 22MG. Y logra una adjudicación de I+D de DOE de Estados Unidos por 2'2 MM \$. Se produce una inversión estratégica en O2 Diesel.

El año 2006, arranca BCyl (53 MG), se produce la expansión de las plantas Portales, en Nuevo Méjico, Estados Unidos y BG, se establece una sociedad conjunta con Cepsa (Total) para una planta de Biodiesel de 59MG, tiene lugar una adjudicación en Francia por 152 MG, Abengoa Bioenergía exporta desde España a la Unión Europea 43 MG de etanol y realiza una inversión estratégica en Dyadic.

En marzo de 2007 el Consejo de Presidentes de la UE estableció un objetivo vinculante para todos los Estados miembros de un consumo del 10% de biocarburantes en el año 2020. La CE considera que este objetivo es sostenible sin presionar los mercados alimentarios.

Por último, hasta el verano de 2007 en Abengoa Bioenergía, se han producido: el arranque de ABNE (88 MG), la adjudicación por parte de DOE de 76MM\$ para la construcción de la primera planta comercial para producir etanol a partir de biomasa lignocelulósica. Además se implanta el proyecto Cenit (30 M€), para el diseño y desarrollo de nuevas tecnologías de producción y uso del etanol.



Planta de York, NE



Planta de Colwich, KS

CAPÍTULO 19

CAMBIO CLIMÁTICO, ¿UN RIESGO MANEJABLE?

Juan Velarde Fuertes

Vocal del Tribunal de Cuentas

Premio Rey Jaime I a la Economía 1996

Conviene señalar que da la impresión de que la Humanidad en su conjunto no ha interiorizado que la Revolución Industrial, que de modo extraordinario ha mejorado nuestras vidas, es algo perfectamente asumible. Es evidente que la Revolución del Neolítico, con sus creaciones que van desde la navegación a vela a la agricultura; desde el cálculo matemático a la aparición de la ciudad; desde la creación del derecho a la difusión del libro; desde la organización militar a la existencia de infraestructuras fijas para el transporte terrestre gracias a la energía de sangre, y así sucesivamente, había proporcionado al hombre ventajas notables respecto a lo que había significado la vida previa transcurrida desde la aparición del Homo sapiens sapiens. Todo eso dura, en su plenitud, desde el 1000 antes de Cristo a 1750 después de Cristo. Prácticamente 3.000 años han creado una sabiduría convencional muy potente, vinculada íntimamente con nuestra cultura.

A consecuencia de la situación llamada protoindustrial, visible en Europa en los siglos XVII y XVIII, desde finales del siglo XVIII –Cipolla propone la fecha de 1783, cuando por el Tratado de Versalles concluye la guerra que había conducido a la independencia de los Estados Unidos– a ahora mismo, se ha originado una especie de colosal estallido que lo ha alterado todo. Piénsese que nuestro Séneca, o nuestro Alfonso X el Sabio, hubieran entendido perfectamente todo lo que sucedía en Europa, y por supuesto en España, en la época de Carlos III. Hoy, no entenderían absolutamente nada.

Esto es lo que, a mi juicio, ha fomentado la aparición de mensajes agoreros continuos, unidos todos ellos a la convicción de que ese bienestar material creciente que se inició, en forma de exponencial –así lo dibujó perfectamente Fogel en 1999–, va a desaparecer muy pronto. La relación de estas profecías es bien conocida: en primer lugar, la de Malthus, al indicar que la población haría saltar por los aires este progreso material. Lo liquidó, en primer lugar, un avance de la civilización industrial originado en el borde de los siglos XIX y XX, derivado del planteamiento de Liebig, y que provocó la fabricación de abonos químicos. Finalmente, el freno al incremento de la población, que ya se adivinaba en las curvas logísticas de numerosos países, y que, como ha señalado Amartya Sen ya se anunciaba en un escrito de Condorcet.

También se había comprobado empíricamente con la ley de Bertillon. Por eso, la población toda del mundo tiende a estabilizarse en el siglo XXI con mucha claridad. Además, a finales del siglo XXI, con el descubrimiento de los transgénicos, el riesgo del hambre pasa definitivamente a no tener ya sentido. Antes bien, como ha expuesto aquí, el 10 de agosto de 2007, el profesor Lobo, el problema económico muy serio que acecha a la humanidad, es el de la obesidad.

El segundo pánico fue el señalado por William Stanley Jevons en su obra The coal question. El progreso industrial, que había cambiado al mundo en el siglo XIX, se debía, en grandísima parte, a que un mineral, el carbón, generaba, incluso en pequeñas cantidades, enormes sumas de energía. Al propio tiempo era capaz de convertirse en un reductor de los óxidos de hierro, y generar una creciente industria siderúrgica. Pero si la civilización se basaba en las minas de hulla, cuando éstas se agotasen, ¿qué sucedería? También a finales del siglo XIX surgió la solución, al conocerse, gracias a la corriente alterna, cómo trasladar a grandes distancias la energía eléctrica. Agréguese el descubrimiento del motor de explosión, que permitió utilizar los yacimientos de petróleo. Pero, ¿qué ocurriría cuando la primera, la electricidad, generada por corrientes fluviales, hubiese agotado las posibilidades en este sentido de cada país? ¿Y cuando, como el carbón de Jevons, los hidrocarburos fuesen pasando a la vertiente que sigue al llamado pico de Hubbert? A principios del siglo XX, con la fórmula $E=mc^2$, de Einstein, se señaló dónde se encontraba el mundo inagotable de la energía. Generarla, con la tabla periódica de Mendeleief delante, podrá hacerse, bien con los elementos de mayor peso atómico, gracias a la fisión, encabezado este procedimiento por el uranio, bien con los elementos de menor peso atómico, debido a un proceso de fusión, gracias, sobre todo, a un isótopo del hidrógeno del que existen cantidades ingentes -piénsese en el agua del mar-, el tritio, con la reacción litio-tritio.

El tercer pánico se generó al surgir el riesgo de la masificación. Tuvo lugar, básicamente, en 1930, con dos ensayos, absolutamente independientes: el de Ortega y Gasset, titulado La rebelión de las masas y el de Keynes, en La economía de nuestros nietos. Las masas, al controlar el poder a través del mecanismo democrático, manipuladas por los demagogos, desarticularían la economía, al exigir continuos incrementos de gasto público. Determinados planteamientos keynesianos, derivados de la Teoría General de la ocupación, el interés y el dinero aparecida en 1936 fueron destruidos en buena medida por Milton Friedman en 1968. La vuelta hacia planteamientos por el lado de la oferta, y no de la demanda, se generalizó en todo el mundo. Además, el crecimiento del gasto público fue liquidado, en el terreno fiscal, por la Escuela de Virginia, con Buchanan al frente. La contención del gasto público se ha impuesto por doquier.

El cuarto pánico fue el planteado por Galbraith. El hombre de la Revolución Industrial se lanza, cada vez con mayor fuerza, a demandar bienes y servicios divisibles, desde automóviles a platos cocinados, desde trajes a viajes de turismo, desde televisores a conciertos de rock. Como el Producto Interior Bruto (PIB) es limitado, eso genera, automáticamente, una disminución de los bienes y servicios indivisibles, desde la seguridad ciudadana, a excelentes servicios sanitarios públicos; desde buenos niveles educativos a un marco jurídico perfecto o a una excelente lucha contra la corrupción. Actualmente estamos en medio de esta problemática. Se trata de una cuestión de educación ciudadana, y desde que se planteó por Galbraith, sobre todo en The affluent society, todo lo relacionado con el fomento de los bienes indivisibles ha adquirido prioridad, muy especialmente en Europa.

El quinto pánico vino generado por un trabajo de Meadows et/al que patrocinó y divulgó el Club de Roma. Los minerales, las materias primas, la energía habitual, tendían a agotarse rápidamente. Esto coincidió con el trauma originado por dos formidables choques petrolíferos en los años setenta, que se agregaba a otras subidas importantes de precios de alimentos, materias primas metálicas y recursos ener-

géticos. Cundió la alarma mundial. Desde el presidente Carter con un Informe famoso, a las Naciones Unidas encargado a Leontief, ese pánico se disparó. Poco a poco todo se fue atenuando. Manners probó que las estimaciones de recursos estaban minusvaloradas; el planteamiento Singer-Prebisch, como señaló Drucker, volvió por su sendero habitual; las profecías muy tétricas de todos los que las habían formulado se vinieron al suelo porque conforme avanzaban los nuevos planteamientos tecnológicos, se observaba una sustitución de materias primas escasas por otras abundantísimas, como, por ejemplo, ocurrió con el silicio. El Club de Roma fue contemplado cada vez con menor respeto científico, y el desarrollo de la biotecnología, de la nanotecnología, de la informática, poco tiene que ver con esos planteamientos. Se observa que el factor realmente escaso es el cerebro, y que para que ese pánico no triunfe, es absolutamente necesario emplear procedimientos pedagógicos que, para su avance, poquísimos tienen que ver con los agobios pronosticados por el Club de Roma.

El sexto pánico ha pasado a tener una creciente actualidad. Ahora mismo, ante un verano caluroso, se pasa a sospechar que puede esto ser el inicio de una catástrofe derivada de un cambio climático capaz de convertirse en incompatible con la civilización. Este cambio, además, lo ha generado el propio hombre, al desarrollar la Revolución Industrial, y es posible que, a poco descuido que tengamos, pueda convertirse en irreversible. Precisamente en el volumen que en este momento se presenta, señala Luís Balairón Ruiz, que el gran precedente de todo esto se encuentra en el artículo del científico sueco Svante Arrhenius, publicado en abril de 1896, Sobre la influencia del ácido carbónico en el aire sobre la temperatura de la superficie.

Resulta obligado pasar a exponer, con frialdad absoluta, lo que de verdad sucede, en la medida que se pueda conocer, tanto en relación con el cambio climático en sus enlaces con la economía, como con la vida de la sociedad, y, si se me apura, de la Humanidad. Saber a fondo, del modo más completo posible, esta realidad, pasa a ser fundamental para comprender las posibilidades de multitud de aspectos de la economía. Lo nuevo es que, hasta ahora, lo que sucedía en el clima se consideraba que era un elemento exógeno que, además, influía siempre del mismo modo en el proceso económico. Ahora, quizá sea preciso introducir una función implícita, en la que clima y economía se relacionan íntimamente. ¿O bien deben mantenerse las convicciones anteriores, esas que llevaron a Perpiñá Grau a colocar el clima en lo que denominaba, por eso, infraestructura económica?

También considero que en estos momentos conviene plantear esto en Asturias. Si se concluye por confirmar la tesis de Arrhenius, es evidente que el problema del carbón se mantiene. Asimismo se agrava la situación de numerosas plantas industriales que tienen una importancia considerable en el bienestar económico del Principado. Pero una comprobación científica no es, por supuesto, un embarcarse en una opinión derivada de un nuevo pánico que, en este caso, se entremezcla con algo adicional. Desde mediados del siglo XIX, con mucha fuerza -hay precedentes anteriores- se ha considerado posible que funcione algún tipo de utopía que tuvo como base la sustitución de un malvado, el capitalismo.

Esta propuesta utópica se articuló, esencialmente, en tres líneas, las tres debeladoras del capitalismo. Una, la anarcosindicalista, nacida en la I Internacional y capitaneada por Bakunin. No ha sobrevivido más allá del final de la Guerra Civil española. Lo que queda de este movimiento no tiene, en parte alguna, significación importante. Otra ha sido el marxismo, en su marcha más ortodoxa, la que tras Lenin, se articuló al sistema triunfante en Rusia en 1917, y que después saltó a multitud de países, desde Cuba a Corea del Norte, de China a Alemania oriental. Tras 1989 y la caída del muro de Berlín, se encuentra en franco retroceso y liquidación. La tercera es la socialdemócrata. Tras el revisionismo de Bernstein abandonó a Marx; gracias a Keynes y el circo de Cambridge, tornó a tener un papel extraordinario. Hoy en día, como ha

señalado, por ejemplo Ignacio Sotelo, la crisis ideológica se ha apoderado de esta corriente, que en general se refugia, tras la crisis del keynesianismo, en planteamientos típicos de un partido burgués radical. El texto de Giddens lo muestra.

Pero la repulsa al capitalismo, mezclada con el pánico a la globalización, ha buscado algún tipo de refugio intelectual. Este ha sido el derivado del ecologismo, y de planteamientos, de nuevo, sobre la finitud de los recursos a nuestra disposición, que se acentúa por la emisión de CO₂. La fuerza que siempre tiene este sentimiento –recordemos el ensayo de Mises La mentalidad anticapitalista-, hace que sea necesario, no dejarse arrastrar más que por proposiciones científicas, porque es muy fácil saltar del problema del calentamiento a críticas a quien lo promueve: la civilización creada por el capitalismo.

Como presidente de la Real Sociedad Geográfica, y recordando el papel de la Royal Geographical Society británica cuando destruyó los planteamientos iniciales del Club de Roma, avalé la idea, presentada por el prestigioso Catedrático de Geografía Física de la Universidad Complutense de Madrid, el profesor Sanz Donaire, como vocal de la citada Real Sociedad Geográfica, de convocar un ciclo de conferencias sobre el asunto del cambio climático. Se desarrollaron, con gran éxito, por los trabajos presentados, y la calidad científica de la asistencia, en el Colegio Oficial de los Ingenieros de Caminos, en Madrid.

Simultáneamente hablé con mi colega, Juan E. Iranzo, director del Instituto de Estudios Económicos, quien también estaba interesado, por motivos obvios, en conocer lo que había de verdad y por qué debían preocuparse, o despreocuparse, los empresarios españoles, en relación con la cuestión del cambio climático. España, en estos momentos, al haber aceptado, en las condiciones que aceptó, el Protocolo de Kioto, pasa a experimentar una carga económica notable, que ha sido muy discutida. ¿Qué información sería podía recibir sobre esto el Instituto de Estudios Económicos?

Esta conjunción de esfuerzos se concreta en este volumen que contiene once ensayos fundamentales, que son, a mi juicio, capaces de presentar seriamente la cuestión del cambio climático. Adelanto que al estudiar la síntesis que se efectúa aquí, así como en otras recopilaciones análogas de reuniones, de debates, de publicaciones, se está lejos de ese simplismo que, por ejemplo, se emite de modo persistente en España, por el Ministerio de Medio Ambiente. Por eso, una visión verdaderamente científica como la que aquí se contiene, merece la pena.

De su primera parte hablará el profesor Sanz Donaire. Yo me limitaré a la presentación de un trabajo estadístico, y de los puramente económicos.

Elvira Zurita García, profesora titular de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica (Geofísica y Meteorología) de la Universidad Complutense de Madrid, contribuye con una aportación titulada Análisis estadístico del cambio climático. En él expone algunos ejemplos de series heterogéneas relacionadas, por ejemplo, con las temperaturas, porque aparecen ciertas situaciones ambientales tan diferente, que pretender que las series son homogéneas es ridículo. Expone el caso de la estación Alicante-Ciudad Jardín, donde “alguna circunstancia ha provocado que las temperaturas máximas disminuyan y que las temperaturas mínimas se mantengan o sean ligeramente más altas”. Explicación muy probable: que ha existido “alguna alteración en las características del suelo, como es el hecho de que se ha plantado césped en todo el observatorio”. O bien los cambios de Madrid-Barajas, en relación con lo que se informó “de la existencia de un cambio de emplazamiento de la garita dentro del aeropuerto que, por circunstancias que se desconocen, no quedó reflejado”. O lo que se puede sospechar de Madrid-Retiro, donde se observa un cambio de tendencia entre 1945 y 1948, que se estima a través del test de A. R. Solow, tal como se expone en su artículo Testing for climatic change: an application of the two-phase model, en el J. Clim. Appl. Met., 1987,

nº 26, págs. 1.401-1.405, lo que coincide con la liquidación de la etapa de economía de guerra, que en España se prolongaba desde 1935, a causa del enlace de la Guerra Civil, la II Guerra Mundial y los combates con los guerrilleros basados en Francia, que concluyen en 1947-1948, como consecuencia del inicio de la Guerra Fría. Todo esto, más la ampliación de Madrid, se encuentra tras esa situación de isla térmica. Como muy bien indica la profesora Zurita, “hay que actuar con prudencia en los estudios regionales, en aquellas zonas donde la mayoría de los observatorios anteriores a 1970 estaban situados en ciudades que sufrieron un importante crecimiento, como es el caso de la Península Ibérica”.

Por eso, efectúa un desarrollo crítico-estadístico realmente impresionante, concluyendo con unas proyecciones del clima futuro de España realizadas con un modelo RCM, Regional Climatic Model. Así se llega a una serie de pronósticos de las temperaturas que constituyen parte del cambio del clima español en el periodo 2071-2100 respecto a los valores del periodo 1961-1990, basados en el modelo regional de clima PROMES, de la Universidad Complutense, y expuesto por C. Gallardo, A. Arribas, J.A. Prego, M.A. Gartner y M. Castro, Multi-year simulations with a high resolution Regional Climate Model over the Iberian Peninsula current climate and 2xCO₂ scenario en *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2001, nº 127, págs. 1.659-1682. Vemos así la proyección del cambio estacional en la temperatura media diaria, observándose “que los incrementos térmicos más intensos corresponden al escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero”; los cambios de las precipitaciones medias y, finalmente, que los cambios en los extremos de temperaturas, señalan que “la frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península Ibérica tiende a incrementarse muy significativamente en primavera y en menor medida también en otoño”, y que “la frecuencia de días con temperaturas mínimas extremas en la Península tiende a disminuir”.

Todo esto tiene importantes consecuencias económicas, porque, efectivamente, como se observa por los trabajos presentados, es evidente que no existe unanimidad en el ámbito científico en relación con el candente asunto del cambio climático, pero sí que existe una opinión mayoritaria suficiente como para no considerar que sería irresponsable toda política de no hacer nada a la espera de esa unanimidad absoluta en ese campo científico que, como suele suceder en multitud de ocasiones, puede tardar en aparecer. Como uno de los riesgos es el de la irreversibilidad de la situación si nada se hace, y como algunas de las situaciones posibles tienen efectivamente costes económicos pero, si se plantean bien, da la impresión de que éstos resultarían asumibles, es lógico que haya de plantearse en este volumen esta cuestión de la carestía de los remedios. Recuérdese lo dicho sobre uno de los aspectos de la liquidación del primer pánico, que ha sido la limitación de la natalidad; que para reducir el segundo, fue necesaria una sustitución de energía; que el problema del tercero, exige una alteración en los marcos educativos y políticos; que el del cuarto plantea toda una alternancia cultural y presupuestaria; que el del quinto, ha exigido ese avance científico y tecnológico que ha abierto el paso a la tercera etapa de la Revolución Industrial. Es lógico que el sexto pánico plantee también exigencias, porque, y eso conviene decirlo, ninguno de estos sustos colectivos de la Humanidad estaba radicalmente infundado, y quienes los planteaban no eran un conjunto de charlatanes estúpidos. Lo que acaba latiendo aquí es que aparece, con todas las limitaciones que se quieran, una correlación entre aumento de la temperatura del Planeta y un avance en la industrialización. Pero he aquí que correlación no es causalidad, pero, como me dijo una vez el profesor Estapé, más de una vez no es causalidad, e imprudente en grado máximo sería el político que no lo tuviese en cuenta.

Los profesores de Economía Aplicada de la UNED, Enrique San Martín González y Javier García-Verdugo, en su trabajo Kioto y los bienes públicos globales, parten de la exposición del concepto de bienes públicos, que son aquellos “cuyo consumo no es ni excluyente ni rival”. Alguno de ellos no puede alcan-

zarse más que si se plantean acuerdos en ámbitos supranacionales y, en el caso de los relacionados con el medio ambiente, en ámbitos mundiales. El primero de estos acuerdos fue el de Montreal, de limitación de las emisiones de los gases con clorofluorocarbonos en 1987, porque habían originado un agujero de ozono sobre la Antártida, descubierto en 1985. Y ahora, en esa línea, tenemos a Kioto.

Importantísima aportación de este trabajo ha sido el destacar que el IPCC ha dedicado muy poca atención a la cuestión fundamental de los daños económicos creados por el cambio medioambiental. Nada menos que se alteró fundamentalmente “el objetivo al grupo de trabajo III del IPCC, (orientando su esfuerzo) desde la valoración socioeconómica del cambio climático que tenía asignado en el Second Assessment Report de 1996 a la evaluación de las opciones de control de los gases de efecto invernadero para el Third Assessment Report de 2001”.

De ahí que en relación con el Protocolo de Kioto, que presenta una serie de opciones, “se puede asumir que la elección o ha sido desinformada, o ha estado controlada por criterios políticos en vez de científicos”. Sencillamente falta un estudio adecuado costes-beneficios, y por ahora, “teniendo en cuenta el elevado coste económico que puede llegar a originar el Protocolo de Kioto, su escasa incidencia en el control del clima y el hecho de que hay otros problemas con mayores costes no monetarios, parece necesario plantearse la posibilidad de destinar esos recursos a tareas más urgentes, relacionadas con las precarias condiciones de vida en las que vive gran parte de la población mundial que habita en el Tercer Mundo”.

Y, ¿por qué los Estados Unidos –con Australia- se empeñan en no ratificar el Protocolo de Kioto? Se rechaza el simplismo de que los europeos están más preocupados por el medio ambiente que los norteamericanos. Es un planteamiento engañoso, porque Alemania, por la transformación que significó la integración de los Länder orientales, Francia por el aumento del peso de la generación energética del sector nuclear y Gran Bretaña, por la significación creciente del gas natural en la producción de electricidad, “no se van a ver obligadas a realizar «todo» el esfuerzo al que se habían comprometido en el Protocolo (de Kioto)”. Los países del antiguo bloque comunista se adhieren entusiasmados, entre otras cosas porque han quedado “con un excedente de más de un 30% de las emisiones de CO₂, lo que les podría reportar –a precios de 27 de marzo de 2006, de 27€/tonelada- unos 45.000 millones de euros, es decir, aproximadamente un tercio del PIB de Grecia”. Los países en vías de desarrollo se verán, claro es, favorecidos por el criterio de que “quien contamina, paga”.

La gran base de la oposición de Estados Unidos y Australia está, esencialmente, en el coste económico, debido sobre todo al papel esencial que en sus economías juega el carbón y, además, “no están dispuestos a eliminar esta fuente de energía por cuestiones relacionadas con la seguridad energética”, aparte de ser Australia “el primer exportador mundial de carbón, acumulando cerca del 30% de las exportaciones totales”.

La amenaza de todo esto para España es clarísima. Como no tenemos, desde el parón nuclear de 1982, una política energética razonable, aumentada por nuestra extravagante elasticidad consumo energético/PIB, se generará con nuestra incorporación al Protocolo de Kioto tan calorosamente trompeteada, forzosamente el dilema de, o vernos “obligados a incumplir nuestros compromisos” o tener “que asumir lo que sin duda será un alto coste para nuestra economía”. De ahí que yo, personalmente, sostenga, que el conjunto de la política energética del ministro Montilla, aparentemente sólo obsesionada por efectuar una liquidación de ENDESA, ha sido una calamidad.

La directora del Departamento de Economía Cuantitativa del Círculo de Empresarios, M^a Jesús Valdemoros, en su trabajo Externalidades medioambientales y mecanismos de mercado: el comercio de permisos de emisión, complementa muy bien el trabajo anterior, porque “en enero de 2005 entraba en fun-

cionamiento el mercado de derechos de emisión de gases efecto invernadero de la Unión Europea... y en el que participa España". Maravilla lo exhaustivo de esta presentación de algo que constituye ya, y constituirá aun más en el futuro, uno de los aspectos de nuestra balanza por cuenta corriente. Es importante tener en cuenta, por el teorema de Coase, que "con costes de transacción suficientemente bajos y agentes precio-aceptantes, la asignación de permisos producirá un resultado económicamente eficiente y medioambientalmente eficaz tanto si es por subasta como si es gratuita. Porque los permisos acaban siendo utilizados por quien les da un mayor valor. Por tanto, si desde el punto de vista de la eficiencia el procedimiento es irrelevante, el método de asignación de permisos ha de elegirse atendiendo a otros criterios: viabilidad política, aceptabilidad social, efectos distributivos, competencias, financiación del sistema, etc."

En este trabajo, que roza lo perfecto, seguidamente se analizan los mecanismos de control; los incentivos a la innovación tecnológica que favorece nuevas tecnologías limpias; el comercio, con flexibilidad temporal, de los derechos de emisión, trasladando a los participantes en el programa de permisos comercializables de un periodo a otro; la limitación de los costes de transacción, que "aparecen inexorablemente en cualquier sistema de comercio de permisos"; la definición y titularidad de los derechos de emisión, y todo esto teniendo en cuenta que cualquier forma de comercio de permisos, "no opera en un vacío, sino que lo hace formando parte de un entramado institucional del que recibe influencias y sobre el que influye", cuyo planteamiento tiene forzosamente como orientación que "según recomendación del IPCC, la eficacia de las políticas de lucha contra el cambio climático se verá reforzada si éstas se enmarcan en programas más amplios orientados a los cambios sociales y tecnológicos que a largo plazo se requieren para un desarrollo sostenible". Desde ahora mismo hasta el comienzo de 2008, en la primera fase del Protocolo de Kioto, es preciso aumentar las experiencias sobre todo "para extraer todas las lecciones posibles de cara a un mejor ajuste de estos mecanismos a nuestras necesidades medioambientales y económicas". Es evidente que este artículo constituye "una buena guía para evaluar y juzgar la experiencia acumulada, siempre con la mente puesta en la mejora continua del sistema".

Con la primera parte de este volumen se relaciona en algún grado el trabajo de la profesora del Departamento de Política Económica, cátedra del profesor Donges, de la Universidad de Colonia, Marianne Reudel, El cambio climático y los recursos hídricos: una perspectiva internacional. Pero, sobre todo con la segunda, pues, plantea cómo "un aumento de la temperatura del Planeta se traduciría en unos menores niveles de agua en muchos ríos y lagos europeos. Especialmente afectados se verían aquellos países en los que ya existen problemas de escasez de agua, como España y Portugal", de lo que se derivan "conflictos de asignación de agua entre regiones". Evidentemente, como el coste marginal del uso adicional del agua, también entre nosotros, es prácticamente cero, es automáticamente la puerta a un consumo excesivo de agua. En este artículo, para ayudar a superar esta cuestión, se plantea la necesidad de la existencia de "sistemas de comercio de derechos dirigidos a regular los problemas relativos a la cantidad de agua", e sea, sencillamente, al comercio del agua. Para ello presenta dos mercados del agua: el chileno y el de Nueva Gales del Sur. Pero existe otra cuestión, la de la calidad del agua, analizándose el programa norteamericano del río Tar Pamlico, de Carolina del Norte de derechos de emisión de nutrientes y el sistema de comercio de salinidad del río Hunter en Nueva Gales del Sur. Es curioso que aunque, normalísimamente, a mayor cantidad de agua, mayor calidad, no hay integración de ambos sistemas y lo que también queda evidenciado es que, por supuesto, "el comercio de derechos de emisión es un instrumento potencial para solucionar los problemas de calidad y cantidad de agua", pero "el examen de los distintos planteamientos practicados en Estados Unidos, Chile y Australia pone de manifiesto que el diseño instrumental y el marco institucional varían mucho de unos países a otros".

Uno de nuestros mejores investigadores en economía aplicada es, desde luego, la catedrática de la Universidad Complutense, Ana Yabar Sterling. Lo prueba aquí con su ensayo El mercado de emisiones y las políticas regionales de mitigación del cambio climático. El caso de Andalucía. Aunque se va a centrar la profesora Yabar en sólo una región, parte “del reconocimiento de que la tesis de la distribución territorial del cumplimiento de los compromisos españoles de mitigación no ha recibido respaldo normativo alguno, ni acogida institucional”. Un motivo esencial de esta mala situación española, conviene repetirlo para mostrar uno de los notables y numerosos huecos que presenta nuestra estructura económica actual, se debe a que “el crecimiento económico español se ha producido con un aumento del consumo de energía por unidad de producto (mostrando una pérdida de eficiencia energética primaria frente al resto de los países europeos) y con un aumento de la participación de las energías fósiles en el balance energético nacional, lo que ha elevado la dependencia energética y las emisiones”. Corregir eso es lo que se propone el Programa Nacional de Reformas (PNR), el cual, como es sabido, pretende “la plena convergencia con la Unión Europea en 2010 (en renta per cápita, empleo y logro de la «sociedad del conocimiento»” a través de siete ejes de actuación, y entre otros objetivos contiene el de la mejora de la eficiencia energética”. Pero la profesora Yabar advierte muy justamente que “en los sectores industrial, agrario, forestal y de gestión de residuos, las políticas y medidas nacionales son testimoniales y, en el sector del transporte, son escasas y tardías”. En el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2005, el énfasis en España radica en “la necesidad de una acción más decidida de las Administraciones autonómicas y locales en materia de cambio climático”, pero “en el trasfondo de estas consideraciones a favor de una más decidida implicación de aquéllas se halla el fuerte crecimiento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) en España”. Esto “sitúa a nuestro país entre los más alejados de la UE en el cumplimiento de las metas respecto a las cuales el periodo de demostración está cada vez más próximo”.

El estudio de Andalucía está justificado porque esta Comunidad Autónoma, junto con Cataluña y el País Vasco, se encuentra en un grupo, muy dispar en variados aspectos de su vida económica, pero en el que son muy activas las tres comunidades es en la elaboración y aprobación “de programas de ahorro y eficiencia energética, de movilidad ciudadana, etc., y en formular políticas de ordenación del territorio y otras sectoriales, cuyos efectos asociados de mitigación, aunque no cuantificados, eran esperables”.

Esto, ¿ha generado alguna consecuencia fáctica? Desgraciadamente, la aportación de Ana Yábar nos muestra cómo el desarrollo económico andaluz crea unas emisiones de CO₂ que no dejan precisamente en buen lugar a un desarrollo aparentemente muy desviado de los planteamientos legales. Hay que convenir, además, con la profesora Yábar que en Andalucía, “en términos generales, puede decirse que el análisis realizado y del que da cuenta el presente estudio no permite verificar que se hayan adoptado medidas de mitigación adicionales en los sectores transporte, residencial y comercial/institucional, en los niveles autonómico y local de la administración pública andaluza, ni tampoco que ellas sean potencialmente más efectivas que las del ámbito nacional”. Y resumen de resúmenes: “En términos de emisiones por unidad de producto los valores de Andalucía y de España son similares; sin embargo el fuerte ritmo de aumento de aquéllas en la región andaluza en los últimos años es muy destacable”. Compruébese al observar que las emisiones de CO₂ de Andalucía crecen a mayor ritmo que las de España en su conjunto: entre 1990 y 2003 el 62'1% frente al 45'3%.

Cierra el volumen el trabajo de la Ayudante de Economía Aplicada de la Universidad Complutense de Madrid, Yanna Gutiérrez Franco, titulado Kioto y Mercado Europeo de emisiones de efecto invernadero: implicaciones para España.

Tres cuestiones muy importantes quedan claras gracias a este estudio. La primera, “la dificultad que actualmente afronta nuestro país para lograr el cumplimiento de nuestros compromisos adquiridos en

Kioto". Téngase en cuenta la difícil meta de lograr nuestra nación una limitación en sus GEI de un 15% respecto a los niveles de 1990, "cuando ya en 2005 los GEI (gases de efecto invernadero) lanzados a la atmósfera por nuestro país han excedido un 52'88% los emitidos en 1990", dato que se toma del trabajo editado en 2006 por Comisiones Obreras, del que son autores J. Santamaría y J. Nieto bajo el título Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2005): "Pero, además se trata de conseguir el cumplimiento con un sacrificio económico asumible", y esto no está claro.

En segundo lugar se aclaran las causas de esto, y se pone de relieve, algo que yo personalmente sostengo desde hace mucho tiempo: en Kioto se negoció mal. Muy probablemente tiene razón el libro de Varming et.al, Tradable CO₂ permits in danish and energy policy, RISO National Laboratory, Roskilde, agosto 2000, cuando señala que se alcanzaron resultados favorables cuando quienes negociaron en Kioto fueron ministros de Hacienda, y desfavorables cuando lo hicieron ministros de Medio Ambiente. Además, y la investigación histórica da la impresión de que le dará la razón, existe un motivo político: "A pesar de que nuestro compromiso con Kioto no es de reducción, sino que nos permite un margen de aumento de las emisiones... va a resultar difícil alcanzarlo habida cuenta de la senda de ascenso de nuestras emisiones en los últimos años. Dicho aumento se ha debido en gran medida a la falta de aplicación de políticas de control de las emisiones de efecto invernadero en la línea de decisión ante el problema del cambio climático, protagonizada por los dos gobiernos del Partido Popular. Ante la incertidumbre acerca de la ratificación para permitir su entrada en vigor, simplemente se abandonó por parte de estos gobiernos la política de contención de emisiones". Simultáneamente, "las empresas de nuestro país, en general, adoptaron también una posición de pasividad en relación con la agenda del cambio climático".

Finalmente queda una cuestión: ¿qué es lo que se debe controlar más seriamente de cara al futuro? La contestación se deriva de estos párrafos de Yanna Gutiérrez Franco: "La excesiva dependencia energética, el crecimiento desbordado de la edificación de viviendas y la necesidad de una regulación que controle y limite seriamente las emisiones en el sector del transporte, son, a nuestro juicio, los problemas fundamentales que han de corregirse, y cuanto antes". Lo grave es que hacerlo supone lanzar un torpedo a la línea de flotación del modelo de desarrollo que trompetea el Gobierno Rodríguez Zapatero, aparte de que sus tentaciones, no le impulsan, lo que nos vendría muy bien, sino que le frenan, en la generación de energía nuclear.

Además del contenido excelente que se contiene en todos y cada uno de estos once ensayos, en ellos se ofrece una bibliografía muy extensa, que permite al lector, no sólo estar al día, sino ampliar con esta literatura sus conocimientos sobre este problema. Estimo que no menos de 350 publicaciones sobre estas materias se exponen, perfectamente localizables, en este volumen.

El sexto pánico está bien afianzado. Parecería que surge de aquello que cantó así Espronceda en El Diablo Mundo:

Y pavor y miedo infunden
Los bramidos de los vientos;
Que al mundo amagan su fin
En guerra los elementos.

Pero, frente a esto, el hombre prometeico de la Revolución Industrial tiene siempre un recurso. Aquel que Hegel señaló así, y hasta ahora se ha cumplido: "Cuando el hombre convoca la técnica, la técnica siempre comparece". Sospecho que ahora, en relación con el clima, eso es lo que ya comienza a suceder.

