

Hacia un marco conceptual Sistémico-Coevolutivo para el Análisis de las Políticas de Promoción de la Energía Renovable

Miguel A. Gual Font
Dpto. Economía, Mét. Cuant. e Hª Econ. * Universidad Pablo de Olavide
Ctra. Utrera, Km 1 * 41013 Sevilla

RESUMEN

El análisis de las políticas públicas suele ceñirse a criterios de eficiencia basados en modelos neoclásicos que pretenden determinar “ex-ante” las cualidades de las diversas alternativas en base a la minimización de los sobre-costes sociales (definidos, en el caso de los mercados energéticos renovables, como los excedentes del productor o beneficios más que competitivos del mismo). Estos métodos conducen a conclusiones que suelen favorecer a las tecnologías establecidas y, por tanto, van en contra de la promoción de la energía renovable. En este trabajo, se propone un marco teórico-analítico alternativo que integre y tenga en cuenta las aportaciones de las diversas teorías y escuelas con la intención de contribuir a un mejor entendimiento de las cuestiones que determinan la difusión efectiva de las tecnologías energéticas renovables en los mercados eléctricos.

Palabras clave: tecnologías energéticas renovables (TER), políticas de promoción, políticas de I+D&D, políticas de difusión, modelo sistémico-coevolutivo.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable (FER) emanan de cuatro procesos naturales a escala planetaria: (1) la energía procedente del Sol, (2) el ciclo del agua, (3) el calor generado por las reacciones internas de la Tierra y, (4) la atracción de la Luna y el Sol sobre los océanos. Estos procesos se aprovechan mediante tecnologías energéticas renovables (TER) que permiten su transformación en energía útil: electricidad, calor, bio-combustibles e hidrógeno. Estas tecnologías constituyen un conjunto heterogéneo de aplicaciones en distintos estadios de desarrollo; unas todavía en fases de investigación (solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, mareomotriz) y otras en situaciones de madurez y creciente difusión en los mercados energéticos (eólica, biomasa, hidráulica y geotérmica).

Principales Tecnologías Energéticas Renovables:

La energía solar térmica. La radiación solar se capta (colector de calor) y el calor se transfiere a un medio portador de calor (fluido). El medio calentado puede usarse directamente (agua caliente) o indirectamente, mediante un intercambiador de calor a su destino final (sistemas de calefacción, refrigeración, desalinización, electricidad...).

La energía solar fotovoltaica. La radiación solar se capta y se transforma directamente en energía eléctrica mediante las células fotovoltaicas (silicio) que permiten el flujo de electrones por diferencia de potencial eléctrico. Aplicaciones: generación de electricidad (sistemas aislados y sistemas conectados a red).

La energía eólica. Las corrientes de aire que se producen por la radiación solar y los diferenciales de temperatura en la atmósfera se aprovechan mediante palas y turbinas aerodinámicas.

La biomasa. Las plantas mediante el proceso de fotosíntesis son capaces de fijar carbono de la atmósfera y transformarlo en energía útil. Esta energía puede utilizarse bien para producir electricidad y/o calor mediante su combustión, bien para producir biocombustibles.

La hidráulica¹ se basa en el aprovechamiento de la energía liberada por saltos de agua, naturales o artificiales, para la producción de energía eléctrica.

La geotérmica aprovecha el calor desprendido en forma de gases del interior de la corteza terrestre para producir energía (calor y electricidad).

La mareomotriz aprovecha los flujos de agua producidos por las mareas para producir electricidad mediante turbinas.

Fuente: elaboración propia

La crisis del petróleo de 1973 y los crecientes problemas ambientales, principalmente el cambio climático acelerado, son las primeras causas del reciente interés por el desarrollo de estas tecnologías en los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y, significativamente, de los pertenecientes a la Unión Europea (UE). Las ventajas de promocionar este tipo de tecnologías son múltiples y ampliamente

¹ Normalmente se establece una distinción entre pequeña hidráulica (<10MW) y gran hidráulica (>10MW).

reconocidas por la comunidad internacional. Se distinguen tres grandes grupos: (1) ventajas medioambientales - aportación a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), reducción de la contaminación a escala local, etc. -, (2) ventajas tecnológicas – pueden incrementar la eficiencia del sistema eléctrico mediante una producción distribuida, contribuyen a mejorar la garantía de suministro, etc. - y, (3) ventajas socioeconómicas – tienen efectos positivos sobre la cohesión, el empleo y el desarrollo local, reducen los ratios de dependencia energética del exterior y se apoya el crecimiento de nuevos sectores industriales competitivos a escala internacional. Sin embargo, todas estas ventajas no son suficientes para garantizar su difusión en los mercados energéticos actuales. De hecho, los datos parecen indicar que, en las últimas tres décadas, el crecimiento de la demanda de energía a escala planetaria ha sido superior al ritmo de adopción de las TER, y las proyecciones indican que esta brecha puede seguir incrementándose en los próximos años.

En los países de la OCDE, la presencia de barreras tecno-institucionales y económicas al desarrollo de las TER parece ser la causa principal de su lenta difusión en algunos mercados. Concretamente, en los mercados eléctricos de la UE las TER parecen sumidas en un proceso de innovación-difusión que opera sobre un marco tecno-institucional y de mercado subyacente, caracterizado por fuerzas dinámicas a favor y en contra de la difusión renovable.

Por una parte, las sendas dependientes (lock-in), creadas por décadas de supremacía de las tecnologías basadas en combustibles fósiles y energía nuclear en mercados energéticos prácticamente monopolistas y subvencionados, han propiciado que los costes medios de generación de estas tecnologías resulten significativamente inferiores a los de la producción de electricidad a partir de fuentes de energía renovable (E-FER). Si bien es cierto que la internalización en los precios de mercado de los costes externos producidos por las tecnologías convencionales implicaría una transición acelerada hacia opciones

renovables, no es menos evidente que dicha internalización resulta improbable en los contextos económicos actuales. La existencia de “complejos tecno-institucionales” asentados que influyen y, en muchos casos, definen la planificación energética futura es la mayor barrera a la difusión de la energía renovable.

Por otra parte, la transformación estructural de los mercados eléctricos, vía privatización y liberalización de grandes segmentos del sector, unida al proceso de integración de la UE, tanto abre ventanas de oportunidad para una difusión acelerada de las TER, como crea riesgos y situaciones de debilidad que pueden frenar dicha difusión.

Este telón de fondo propicia el planteamiento de un proceso sistémico y coevolutivo que determina la dirección y velocidad de los cambios tecno-institucionales y ambientales hacia sendas sostenibles o insostenibles de desarrollo energético. Es en este contexto donde las políticas de promoción de la energía renovable cobran todo el sentido, pues su objetivo último es la difusión de las TER en los mercados energéticos en la búsqueda de una mayor sostenibilidad.

No obstante, en los últimos años, los relativamente ambiciosos objetivos comunitarios unidos al creciente desarrollo de ciertas TER en algunos países, ha propiciado un debate político que gira en torno a la eficiencia y eficacia de las diversas políticas de promoción. Este debate, en la literatura especializada, ha tenido aportaciones desde muy diversos ámbitos, pero desde la perspectiva económica se ha centrado en los análisis de estática comparativa para la identificación de instrumentos que sean consecuentes con un mercado liberalizado y minimicen el coste de alcanzar los objetivos a los consumidores. Las conclusiones que se derivan de estos estudios de corte neoclásico podrían estar en contradicción tanto con la evidencia empírica, como con las contribuciones de otros enfoques basados, fundamentalmente, en las teorías del cambio tecnológico. Existe, por tanto, la necesidad de elaborar un marco teórico-analítico comprehensivo, que recoja

todas estas aportaciones y permita una estructuración mejor del debate sobre los efectos y consecuencias dinámicos de aplicar distintas políticas de promoción de la energía renovable.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

“...el cuerpo principal de la teoría económica quedó siempre en la orilla ‘estática’ del río; y no se trata de complementar la teoría estática (...), sino de sustituirla por todo un sistema de dinámica económica general, dentro del cual la estática quede incluida como caso especial” (Schumpeter, 1954; p. 1256).

Las políticas de promoción de las tecnologías energéticas renovables se enmarcan en un contexto teórico complejo, cuya comprensión resulta ineludible si se pretende analizar con rigor, tanto el origen como el resultado de su aplicación en la búsqueda de sendas energéticas más sostenibles. Este enfoque conlleva, necesariamente, la utilización de fundamentos teóricos diversos y, en algunas ocasiones, contrapuestos, pero que permiten estructurar el análisis de las causas y efectos del éxito/fracaso de los diversos instrumentos políticos para apoyar el desarrollo de un sector energético renovable.

Por una parte, las distintas perspectivas de las teorías de la economía neoclásica y la economía ecológica en lo referente al tratamiento y explicación de la variable tecnológica en el proceso de crecimiento económico y desarrollo sostenible conducen a conclusiones divergentes. La proposición neoclásica conduce a los modelos de crecimiento endógeno que engarzan con la teoría de equilibrio o de cambio tecnológico inducido (CTI), mientras que las visiones de sostenibilidad fuerte de la economía ecológica establecen límites entrópicos y la necesidad, entre otros, de sustituir la utilización de los recursos agotables por recursos renovables (figura 1).

Por otra parte, la teoría del cambio tecnológico evoluciona desde el modelo lineal schumpeteriano hacia los modelos de CTI influenciados, por un lado, por la teoría de la innovación y, por otro, por los ya mencionados modelos de crecimiento endógeno. Los problemas explicativos de estos modelos, junto al rescate de la idea de “destrucción creativa” de Schumpeter, transformaron el modelo lineal en un modelo evolutivo. Este

modelo se caracteriza por la coexistencia de dos fuerzas de cambio: (1) los rendimientos crecientes (David, 1985; Arthur, 1990; Perkins, 2003 y otros) y regímenes tecnológicos (Nelson & Winter 1977) que conducen a situaciones de lock-in y, (2) la existencia de shocks externos que alteran de manera estocástica la dirección del cambio tecnológico.

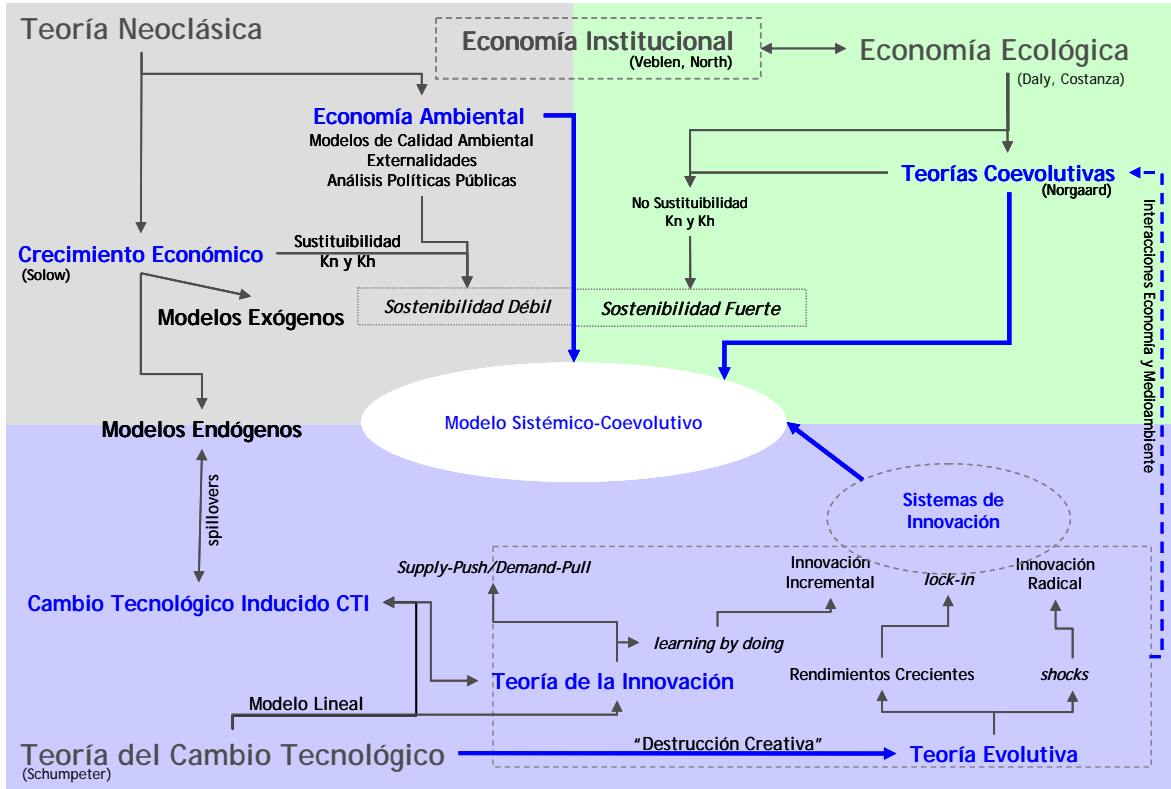
Estos fundamentos teóricos sirven de base para la propuesta de un modelo sistémico evolutivo de cambio tecnológico, que aborda de manera específica el tratamiento de políticas y tecnologías energéticas. Este modelo permite analizar las interacciones de los sistemas tecnológico, institucional y de mercado en relación al proceso de difusión de las TER.

La existencia de shocks ambientales (agujeros en la capa de ozono, cambio climático...) en un plano holístico y de shocks de mercado (crisis del petróleo 1973) a escala macroeconómica sirve de punto de partida a la idea de la coevolución sistémica, que se fundamenta en las recientes teorías coevolutivas de los sistemas económico-ecológicos (Norgaard, 1992; Gowdy, 1994) y en los límites a la sustitución tecnológica establecidos desde la economía ecológica (Costanza et al, 1997; Martinez-Alier, 1990 y, Faucheux & O'Connor, 1999, entre otros).

A partir de todas las teorías anteriormente expuestas se trazan las bases de análisis de las políticas de promoción de la ER. Por una parte, la teoría neoclásica ha tratado de manera exhaustiva las implicaciones de las políticas ambientales sobre los incentivos a la innovación (Kneese et al, 1975; Jaffe et al, 2002; Field et al, 2002; etc.). Este enfoque se plantea como punto de partida de los trabajos que estudian estas políticas (Schaeffer et al, 1999b y 1999b; Morthorst, 2000; Boots et al, 2000; Gual et al, 2001; Lamy et al, 2002, etc.) y, aunque sus restrictivos supuestos limitan su aplicabilidad en un contexto como el descrito, su análisis propicia un punto de partida interesante para la comprensión de las posibles ventajas e inconvenientes de aplicar unos tipos de políticas frente a otras. Por otra parte, los sistemas nacionales de innovación (Freeman, 1987, OCDE, 1992, etc.) se

presentan como sistemas complejos de interacción tecno-institucional (Unruh, 2000) y suponen una aproximación integrada a la política de innovación y difusión tecnológica (Soette & Arundel, 1993).

Figura 1. Fundamentos Teóricos



Fuente: elaboración propia

Todo ello, conduce al planteamiento de un modelo conceptual sistémico-coevolutivo específico para el análisis de las tecnologías y políticas de promoción renovables. Este modelo integra las nociones coevolutivas de la economía ecológica con las cuestiones básicas que emanan de la teoría evolutiva del cambio tecnológico. Esto es, las interacciones entre los grandes sistemas económico, ambiental y social por un lado, con los procesos de cambio incremental-radical y los sistemas de innovación como unidades estructurales de la coevolución sistémica, por otro. Todo ello confluye en la definición de un modelo de análisis concreto en el que el sector de generación de la E-FER se sitúa en el centro de los sistemas tecnológico, institucional y de mercado, y las políticas de promoción de la energía renovable se perfilan como las fuerzas dinámicas que pueden romper la situación de lock-in y conducir el sector hacia sendas más sostenibles.

UN MODELO SISTÉMICO-EVOLUTIVO DEL CAMBIO TECNOLÓGICO

La concepción sistémica del proceso de cambio tecnológico se remonta a los trabajos de Nelson & Winter (1977) y Dosi (1982) sobre regímenes y paradigmas tecnológicos caracterizados por modelos mentales compartidos. La literatura evolutiva, sin embargo, ha ampliado esta acepción por la de “sistemas tecnológicos” definidos como “el complejo global de conocimiento científico, prácticas de ingeniería, tecnologías de producción, características de productos, habilidades y procesos, instituciones e infraestructuras que hacen la totalidad de la tecnología” (Kemp et al, 2000; p. 11).

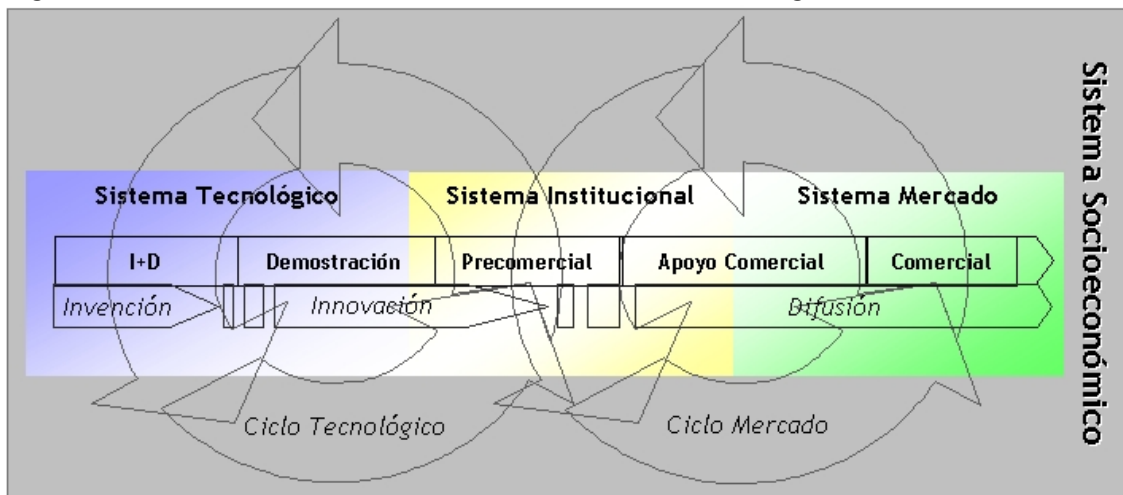
El modelo inicial que se propone como punto de partida combina un enfoque de sistemas complejos en interacción y el modelo genérico del sistema de innovación schumpeteriano modificado (Iccept & E4tech, 2003) para acomodar mejor el tratamiento de políticas y tecnologías (figura 2). Este modelo ampliado incluye como estadios del proceso: 1) I+D básico y aplicado, 2) proyectos de demostración, 3) desarrollo precomercial, 4) desarrollo comercial con apoyo público y, 5) tecnologías comerciales.

En este contexto, los sistemas tecnológicos se definen de manera más precisa para poder establecer de forma más clara las interacciones con otros sistemas complejos como son el mercado y las instituciones². En esta línea, Unruh (2000; p. 825-6) señala que “a escala macroeconómica, los sistemas tecnológicos y las instituciones pueden llegar a estar íntimamente interrelacionadas, nutriéndose unos de otros en un sistema de auto-referencia, al que llamo Complejo Tecno-Institucional. Estos complejos se componen de grandes sistemas tecnológicos e instituciones públicas y privadas que gobiernan su difusión y uso. Los Complejos Tecno-Institucionales emergen a través de la coevolución sinérgica iniciada por los rendimientos crecientes tecnológicos y perpetuada por el surgimiento de diseños tecnológicos, organizativos e institucionales dominantes”.

² Nótese que en las definiciones convencionales las instituciones y el mercado están incorporados al término de sistemas tecnológicos. Tal y como señala Unruh (2000; p.819) “...esta naturaleza multinivel de los sistemas tecnológicos puede crear un problema de ‘nivel de análisis’, puesto que la unidad de observación puede ser definida a cualquier nivel de sistema o subsistema”.

Adicionalmente, estos sistemas tecnológicos, institucionales y de mercado se conciben como incluidos en el más amplio sistema socioeconómico dónde tienen lugar todas las interacciones a este nivel.

Figura 2. Modelo Sistémico-Evolutivo del Cambio Tecnológico



Fuente: Elaboración propia a partir de Icept & E4tech (2003) y AIE & OCDE (2003b)

Por último, la Agencia Internacional de la Energía y la OCDE aportan la idea de un “ciclo virtuoso” conformado por dos ciclos interrelacionados³ – el “Ciclo Tecnológico” y el “Ciclo de Mercado” - que describe el proceso de interacción/ interrelación entre los diversos sistemas planteados. AIE & OCDE (2003b; p. 13-14) señalan que “el desarrollo tecnológico y la experiencia de mercado están fuertemente interrelacionadas y pueden funcionar como un ‘ciclo virtuoso’ (...); los ‘ciclos virtuosos’ tienen en cuenta las relaciones positivas y de refuerzo entre la I+D tecnológica, las mejoras en la fabricación, y el aprendizaje de la experiencia en el mercado que pueden ser realizadas por el marco político⁴”.

En el modelo planteado, la evolución o coevolución sistémica se produce a lo largo de las fases del proceso de cambio tecnológico en constante retroalimentación.

El **sistema tecnológico**, en su acepción limitada, comprende todos los elementos – productos y tecnologías, procesos, técnicas y los diversos tipos de conocimiento - que le

³ Ya en 1992 la OCDE planteó que “el concepto de interrelación refleja la naturaleza compleja de muchas tecnologías de producción como sistemas de múltiples partes interdependientes” (OCDE, 1992; p. 57).

⁴ Nótese que el concepto de “circulo virtuoso” se refiere a la existencia fuerzas complementarias que dirigen el desarrollo tecnológico; sin embargo, este “circulo virtuoso” puede convertirse fácilmente en un “circulo vicioso” que genere *lock-in* tecnoinstitucional en tecnologías inferiores. En el caso del sector energético, por ejemplo, puede hablarse de un “circulo vicioso” alrededor de las tecnologías basadas en combustibles fósiles.

permiten interactuar con los diversos niveles institucionales y de mercado. Adicionalmente, se encuentra simbólicamente situado bajo la influencia de los estadios de invención e innovación, pues es en esos estadios donde se produce el acceso de las tecnologías al proceso, y donde la mayor parte de las retroalimentaciones originadas en los sistemas institucionales y de mercado tienen su efecto. Estas retroalimentaciones vienen gráficamente explicitadas por el ciclo tecnológico.

El **sistema institucional** comprende todos los elementos sociales, educativos, culturales, políticos, financieros y legales que intervienen en el proceso de cambio tecnológico. Así pues, resulta interesante distinguir entre (Unruh, 2000): (1) **asociaciones profesionales**. Este tipo de instituciones surgen de la interacción entre profesionales, usuarios y grupos con intereses compartidos que reconocen los intereses colectivos de su colaboración. Su influencia puede llegar a convertirse en una fuerza importante de *lock-in* en términos del establecimiento de normas y estándares informales; (2) **instituciones basadas en el conocimiento con fines educativos**. Se incluyen tanto las instituciones preestablecidas (universidades y centros de investigación) sujetas a algún tipo de adaptación, como las creadas *ad-hoc*. En relación con estas últimas, se han documentado casos de creación de instituciones formativas para solucionar problemas concretos, como la creación de escuelas técnicas para la formación de mecánicos (Fink, 1988⁵); (3) **sindicatos y patronales**. Estas instituciones pueden generar directa o indirectamente importantes efectos de *lock-in*; sobre todo, y en el caso europeo, por su tradicional poder de negociación. En este sentido, y de manera específica, estas instituciones vienen jugando un papel fundamental en su poder de presión sobre los gobiernos a la hora de favorecer o perjudicar la difusión de ciertas tecnologías; (4) **medios de comunicación**. Su efecto en este ámbito es cada vez de mayor intensidad y envergadura. De hecho, su papel como difusores de información y generadores de opinión pública, al menos en los países de la OCDE, es un factor a tener muy en cuenta para analizar su efecto sobre las demandas

⁵ Referenciado en Unruh (2000)

sociales y; (5) **instituciones culturales o del comportamiento**. Conforme un sistema tecnológico se integra en la sociedad puede generar normas informales, costumbres y rituales que generen un estado de aceptación socio-cultural que ayude a perpetuar dichos sistemas.

Jacobsson & Johnson (2000; p. 634) enfatizan la importancia de estimular el desarrollo de redes institucionales de todo tipo para apoyar el proceso de difusión tecnológica en un contexto en el que “una conectividad grande (...) no se crea de manera automática por las fuerzas de mercado, sino que se basa en el desarrollo de la confianza mutua y el surgimiento de una identidad colectiva”.

Además de las anteriores, es preciso identificar las instituciones formales que, dada su cuota de poder, normalmente desempeñan un importante papel regulador. Se identifican las siguientes: (1) las **instituciones gubernamentales**. Estas instituciones son las encargadas de establecer las normas del mercado y las políticas correctoras que se estimen oportunas. Esta implicación es importante por dos razones fundamentales: a) la posibilidad de las políticas institucionales para anular (conducir) las fuerzas del mercado (y corregir externalidades) y, b) el carácter longevo de estas instituciones que aporta estabilidad a los demás sistemas. Un problema detectado en este ámbito tiene que ver con la influencia que los intereses económicos pueden ejercer sobre el poder político; (2) las **instituciones financieras**. Se encargan de proveer instrumentos y capital-riesgo para acometer las inversiones oportunas. Estos mercados de capitales resultan fundamentales para que el proceso tenga éxito en las economías de mercado y, (3) las **instituciones legales**, estrechamente vinculadas a las gubernamentales, se encargan de desarrollar, aplicar y defender las normativas y leyes promulgadas por los Estados. Su papel en el proceso de cambio tecnológico puede ser determinante si no son lo suficientemente ágiles.

La ubicación del sistema institucional en el centro del proceso y bajo la influencia de los estadios de innovación y difusión (figura II.4) no es casual pues, como señala North (1990), la red interdependiente de una matriz institucional produce masivos rendimientos crecientes. Esto se debe a que las instituciones son, precisamente, las que facilitan la mayor parte de las interacciones y retroalimentaciones que se producen entre el ciclo tecnológico y el ciclo de mercado. Esta afirmación es consecuente con las investigaciones de Ruttan (2002) en las que, mediante un modelo de análisis de las interacciones entre instituciones, tecnología, dotación de recursos y dotación cultural, llega a la conclusión de que los procesos históricos que llevan a la innovación institucional se relacionan con el cambio tecnológico mediante interacciones endógenas (costumbres, redes sindicales, etc.) y exógenas (normativa).

El **sistema de mercado** lo constituyen productores y consumidores, así como todos los agentes que realizan transacciones en el mismo. Su importancia en términos del cambio tecnológico es enorme, y ha sido, sin duda, la más estudiada. Simbólicamente se encuentra situado en el modelo gráfico coincidiendo con el proceso de difusión, con la intención de reflejar su papel como origen de los *spillovers* que perpetúan, retro-alimentan y mejoran de manera incremental las tecnologías en lo que se identifica como ciclo de mercado⁶.

Por último, el **sistema socioeconómico** subyace y da soporte a todo el proceso coevolutivo de cambio tecnológico, institucional y de mercado (Malaman, 1998).

Las **interacciones coevolutivas** de estos sistemas generan una serie de fuerzas que determinan, en parte, la dirección y velocidad del cambio tecnológico. Unruh, G.C. (2000) identifica tres: (1) fuerzas de coordinación industriales e inter-industriales, (2) efectos de refuerzo producidos por mecanismos privados para financiar el desarrollo y la difusión de sistemas tecnológicos. Existen dos vías analizadas: a) la autofinanciación (las empresas

⁶ Una distinción importante que se produce entre inversores en tecnologías establecidas e inversores en nuevas e incipientes tecnologías es que sus intereses pueden verse encontrados y, por tanto, sus mecanismos de retroalimentación ir en sentido opuesto.

establecidas son las únicas que se lo pueden permitir) y, b) la financiación externa (las prácticas de aversión al riesgo de las instituciones financieras pueden ser una barrera importante a la difusión de nuevas tecnologías) y, (3) los producidos por la creación de asociaciones privadas e instituciones educativas. Estas fuerzas de cohesión “son importantes para crear, coordinar y perpetuar el conocimiento, las habilidades y los recursos necesarios para mantener un sistema tecnológico” (Unruh, 2000; p.822).

Por otra parte, Kemp et al (2000) identifican como claves en un cambio de régimen tecnológico⁷ los siguientes elementos: (1) largos periodos de tiempo (50 años) para sustituir un sistema por otro, (2) profundas interrelaciones entre el progreso tecnológico y el contexto social y empresarial en los que se aplican las nuevas tecnologías, (3) las nuevas tecnologías al estar inmersas en interrelaciones con otros sistemas, requieren también de cambios en esos sistemas relacionados, (4) las percepciones y expectativas de los agentes en el mercado tienen una importancia radical en un cambio de régimen tecnológico, pues pueden convertirse tanto en barreras al cambio como en catalizadores del mismo y, (5) la importancia de aplicaciones especializadas en la etapa temprana de desarrollo. En este sentido, “los nichos⁸ son importantes porque durante las transiciones tecnológicas facilitan el proceso de aprendizaje (tecnológico y de mercado) y los procesos de permeabilidad social (formación de capital, mecanismos de distribución, difusión de conocimiento, aceptación...) y, además, pueden servir para superar barreras de entrada tales como: economías de escala, acuerdos institucionales, marcos legales en favor de regímenes tecnológicos establecidos, etc” (Kemp et al, 2000; p.14). Existen dos tipos de nichos: (1) los **nichos tecnológicos**, que se producen en fases muy tempranas de la innovación y en contextos en los que los costes son menos importantes que los rendimientos. Un ejemplo clásico es la aplicación espacial de la tecnología fotovoltaica y, (2) los **nichos de mercado**, que referidos a la aplicación exitosa de nuevas tecnologías

⁷ Nótese que en este caso el término régimen tecnológico tiene un sentido amplio y engloba todos los sistemas propuestos en el modelo.

⁸ Nótese que en nuestro modelo de análisis la idea de los “nichos” encaja en el estadio precomercial de cambio tecnológico.

en mercados adyacentes. Un buen ejemplo de este tipo de nichos es la introducción de pequeñas placas fotovoltaicas en el sector de la electrónica.

Los nichos se conforman, por tanto, como elementos básicos en las transiciones tecnológicas dada su capacidad de facilitar el aprendizaje tecno-institucional en un contexto controlado, en el que los agentes sociales tienen la posibilidad de interactuar con la tecnología y el propio proceso de difusión posibilita una reducción de los costes tecnológicos. No obstante, tal y como señalan Kemp et al (1998) mediante el ejemplo de la utilización del automóvil eléctrico (en campos de golf, aeropuertos, etc.), la existencia de estos nichos no garantiza una difusión efectiva a gran escala. Esto se debe, como se ha señalado anteriormente, a la existencia de fuerzas tecno-institucionales complementarias que generan sendas dependientes o “círculos viciosos” en rededor de sistemas establecidos.

Las implicaciones para las políticas de promoción de la energía renovable derivadas del análisis de nichos se formulan en torno al concepto de “**gestión estratégica de nichos (GEN)**”, entendida como “el proceso de gestión del proceso de la experimentación individual de nichos, de tal forma que se facilite el futuro cambio de régimen (tecnológico), mediante el enlace de experimentos y la construcción, en base a sus resultados, de nuevos y más grandes nichos para nuevas tecnologías” (Weber, & Dorda, 1999⁹). En el contexto de este trabajo, este tipo de iniciativas quedan encuadradas en las llamadas políticas de difusión indirectas/ transversales de acuerdo con la idea de que “la GEN no es un sustituto de las políticas existentes, sino una medida adicional útil, que puede ayudar a incrementar la variedad de opciones tecnológicas y, por tanto, trabajar en la dirección de sistemas tecnológicos¹⁰ más sostenibles” (Kemp et al, 2000; p.22).

⁹ Referenciado en Kemp et al (2000).

¹⁰ En un pormenorizado análisis del sector fotovoltaico japonés a escala empresarial, Watanabe et al (2002) muestran como el dinamismo de las empresas (generador de innovaciones endógenas) en un contexto institucional adecuado (un sistema de innovación integrado) con políticas de difusión específicas (“sunshine programme”) para animar la participación intersectorial, han conducido a un “circulo virtuoso” entre I+D, difusión en el mercado y reducción de precios, caracterizado por la presenica de *spillovers* y efectos de aprendizaje que maximizan la eficiencia de los sistemas.

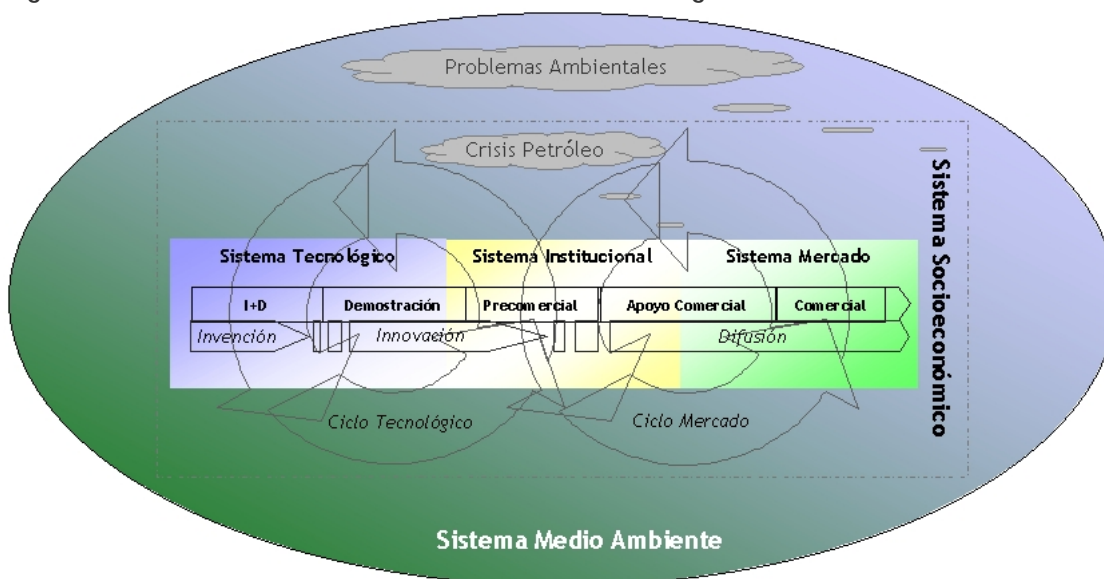
LA INTRODUCCIÓN DE SHOCKS Y LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN EL MODELO

Hasta el momento, el modelo de cambio tecnológico presentado hace alusión únicamente al ámbito socioeconómico y a las interacciones que se producen dentro del mismo; sin embargo, en rigor, resulta ineluctable considerar el sistema medio ambiente como parte consustancial del proceso. En este sentido, la base teórica evolutiva confluye con la idea de la sustentabilidad para redibujar el modelo anteriormente descrito. Tradicionalmente, los trabajos que integran la problemática ambiental en el estudio del proceso de cambio tecnológico reconocen la existencia de *shoks* externos al sistema socioeconómico que determinan, en buena medida, las sendas hacia cambios de paradigma tecnológico.

Desde una perspectiva histórica, la **crisis del petróleo de 1973** y su impacto sobre las economías occidentales determinó las sendas de desarrollo energético posteriores. Cuando el 22 de diciembre de 1973 la OPEP decidió doblar el precio del barril del crudo hasta los 11,65 \$USA generó, además de una crisis económica, una enorme alarma política y social que llevó a una reconsideración acerca de la dependencia energética de oriente próximo y los posibles efectos geopolíticos futuros que ello podía ocasionar. Tal y como recogieron y vaticinaron los cronistas de la época: “el brutal encarecimiento del petróleo, paradójicamente, se integra en la estrategia de las grandes compañías internacionales, que deben acumular beneficios de manera urgente, a fin de afrontar el proceso inevitable de nacionalización de los yacimientos y dedicar grandes masas de capital a buscar formas alternativas de energía” (Ogg et al, 1986; p. 1099). La respuesta internacional e institucional a esta crisis por parte de los países industrializados no se hizo esperar, y en noviembre de 1974, bajo el paraguas de la OCDE, se fundó la Agencia Internacional de la Energía (AIE) con la intención de implementar un programa energético internacional que sirviera para defender los intereses de los países consumidores de petróleo frente a la OPEP. Los objetivos básicos de la Agencia se concretaron en (AIE, 2003): a) mantener y mejorar los sistemas para afrontar posibles perturbaciones en la

oferta de petróleo, b) promover políticas de uso racional de la energía en un contexto global mediante relaciones de cooperación con países no miembros, industrias y organismos internacionales, c) mantener un sistema de información permanente acerca del mercado internacional del petróleo, d) mejorar la estructura de la oferta y demanda energética mundial mediante el desarrollo de recursos energéticos alternativos e incrementar la eficiencia del consumo energético y, e) colaborar en la integración de políticas energéticas y ambientales.

Figura 3. Modelo de interacción sistémica Tecnología-Medioambiente



Fuente: Elaboración propia

El **primer shock** que hace reflexionar a escala macroeconómica sobre la necesidad de un cambio de rumbo energético es, por tanto, un **shock de mercado** que poco tiene que ver con las motivaciones ambientales posteriores¹¹, aunque sin duda contribuyó a desarrollos tecnológicos alternativos. Un buen ejemplo de ello fue el estímulo político a la energía eólica que surgió en EEUU a raíz de un ambicioso programa de investigación entre la NASA y el Departamento de Energía (DOE). Este fue el programa "MOD" que, iniciado en 1975 y dilatado hasta 1987, permitió alcanzar una potencia instalada de 8000 kW, y

¹¹ Una aportación interesante, aunque poco estudiada desde la perspectiva del cambio tecnológico, es la crítica de corte Marxista propuesta por Flavin & Dunn (1999; p.37) acerca del modelo de acumulación de capital en el sector energético: "Un legado de la economía de los combustibles fósiles es la concentración sin precedentes de riqueza económica". En términos más generales, Spash (1999; 428) señala que "una opinión compartida (desde la economía ecológica) con las críticas socialistas (Marxistas) es que los sistemas de libre mercado educan a los individuos para actuar de manera hedonista y egoísta y crear estructuras de poder que se auto-perpetúan reforzando la inequidad social".

generó innovaciones todavía hoy aplicadas (Loiter & Norberg-Bohm 1999). Una aportación interesante de estos autores, desde la perspectiva de análisis del cambio tecnológico evolutivo, es que “los retos tecnológicos derivados de la generación de electricidad a partir del recurso eólico fueron resueltos con una combinación de innovaciones tecnológicas radicales e incrementales, y que (...) la mayor parte de innovaciones radicales se identificaron donde las tecnologías fueron adaptadas de otras industrias o aplicaciones, (...) o bien se desarrollaron bajo un programa público de investigación en respuesta a deficiencias identificadas en diseños existentes” (Loiter & Norberg-Bohm, 1999; p. 87-88).

Los problemas ambientales, primero a nivel local y luego a escala planetaria, determinan el segundo tipo de *shock* normalmente recogido en la literatura del cambio tecnológico. Estos problemas identificados por la mayor parte de instituciones especializadas, tanto internacionales como nacionales, comprenden el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico, la pérdida de diversidad biológica, la degradación de acuíferos, la deforestación, la desertificación, el aumento de los contaminantes orgánicos, el agotamiento de recursos pesqueros y, en especial, los problemas derivados de un cambio climático acelerado. La evidencia científica, histórica y empírica alrededor de estos problemas y el paulatino reconocimiento social e institucional de la responsabilidad de sus causas establecen las bases teóricas de las visiones coevolutivas del cambio tecnológico. No obstante, a pesar de aceptar la existencia e incluso el carácter antropogénico de estos problemas y sus posibles consecuencias, la teoría económica sigue ofreciendo recetas o soluciones parciales¹² fundamentadas en un tecno-optimismo teñido, en muchos casos, de determinismo de mercado. Green (1997; p.93) expone el razonamiento derivado de los fundamentos neoclásicos: “...si la creciente escasez es la característica económica principal de los combustibles fósiles, entonces la dependencia actual del mundo de este

¹² Leontief (1982, p.104) pone de manifiesto un problema de los economistas teóricos muy relacionado con este asunto: “página tras página de las publicaciones económicas profesionales están repletas de fórmulas matemáticas que llevan al lector desde un conjunto de supuestos más o menos plausibles pero completamente arbitrarios hasta conclusiones precisas aunque irrelevantes”.

tipo de combustibles pronto conducirá a incrementos de los precios en términos reales. El incremento de precios en términos reales de la energía inducirá a la búsqueda de recursos energéticos alternativos, ofreciendo un escape potencial al continuo incremento de los niveles de dióxido de carbono y la amenaza de cambio climático más allá de límites tolerables". A pesar de que este tipo de argumento resulta tremendamente atractivo a la hora de formalizar modelos pseudo-explicativos del cambio tecnológico¹³, su validez en términos empíricos es muy limitada y altamente cuestionable. Además de obviar las fuerzas tecno-institucionales y la dinámica social descritas por los modelos evolutivos, su propio razonamiento puede conducir a una conclusión opuesta a la sustitución tecnológica en el sector energético hacia paradigmas más limpios. Esto se debe a que los efectos *lock-in* de las tecnologías e instituciones establecidas pueden extender la vida de los combustibles fósiles incorporando reservas que hoy en día no son comercialmente viables, alargando así, casi indefinidamente, la disponibilidad de estos combustibles en el mercado. Este hecho podría significar que el cambio climático se convierta en un problema insalvable de consecuencias imprevisibles (Green, 1997).

Pese a todo, la introducción del sistema medio ambiente y la idea de shocks disruptivos del status-quo en el modelo propuesto anteriormente, representan el germen conceptual de enfoques teóricos más amplios que dan mejor cabida a la complejidad aparente de las relaciones sistémicas.

Es decir, este modelo propone e incorpora modificaciones teóricas sustanciales con respecto al anterior. Por un lado, explicita la existencia de *shocks* en el proceso de cambio tecnológico a distintos niveles, y cuyas causas y efectos sobre la dirección y velocidad del cambio tecnológico pueden ser tanto complementarias como ir en sentido opuesto y, por otro, incluye el medio ambiente en la concepción sistémica del proceso de cambio

¹³ Además, obviamente, del atractivo político para defender los intereses de los sistemas tecno-institucionales establecidos, como es el caso de la industria del carbón y el petróleo en EEUU.

tecnológico, lo que tiene consecuencias teóricas que enlazan con la idea de “sostenibilidad fuerte” propuesta desde la economía ecológica.

En el caso de los *shocks* propuestos se produce una complementariedad, puesto que tanto la crisis del petróleo como los problemas ambientales estimularon desarrollos tecnológicos alternativos que disminuyeron la dependencia energética y pretendieron asegurar un menor impacto ambiental. Este es el caso de las tecnologías renovables. Sin embargo, no todos los desarrollos tecno-energéticos producidos a raíz de la crisis del petróleo resultaron compatibles con la mejora en la interacción con el sistema medio ambiente. De hecho, las tecnologías nucleares - por motivos de peligrosidad para la salud humana y ambiental -, y las del carbón - por motivo de sus altas emisiones contaminantes -, ambas promocionadas cuantitativa y cualitativamente por encima de las energías renovables hasta finales de los años 90, resultan ir en sentido opuesto a la posible solución de problemas ambientales. Una revisión de los datos sobre el gasto en I+D público en tecnologías energéticas durante las últimas tres décadas muestra esta innegable tendencia.

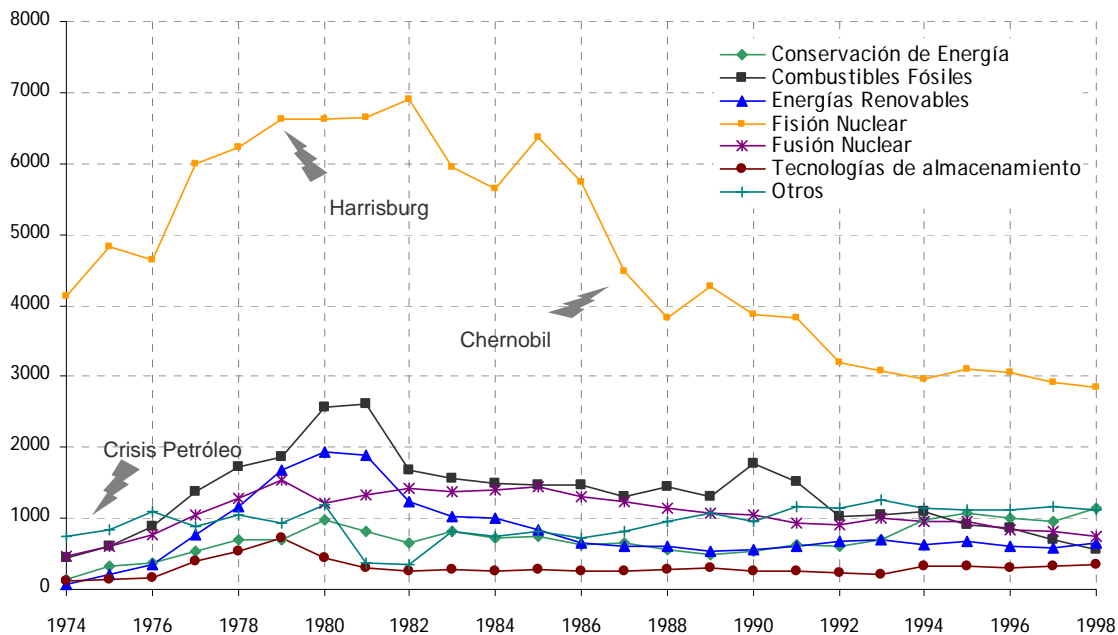
En primer lugar, la I+D en tecnologías de fisión nuclear, heredada de los inicios de la guerra fría, viene siendo, con diferencia, la que mayores fondos públicos ha recibido durante el siglo XX, alcanzando su mayor auge en 1982 con casi 7.000 Millones de dólares. Por diversos motivos, aunque fundamentalmente por problemas de almacenamiento de los residuos radiactivos, las protestas de activistas y movimientos socio-ambientales, y por accidentes de diversa consideración en centrales de todo el mundo – Harrisburg (Pensylvania) en 1979 y, sobre todo, Chernobil (Ucrania) en 1986 – se produjo un cambio de tendencia que, a pesar de continuar en la actualidad, parece haberse estabilizado en los 3.000 Millones de dólares anuales¹⁴. La ventaja sobre el resto de tecnologías queda plasmada en el gráfico sobre la estructura del gasto en I+D

¹⁴ Una posible explicación de este estancamiento es la necesidad de seguir investigando para encontrar soluciones tecnológicas para la disposición de los residuos nucleares.

acumulado que, para el periodo 1974-1998, ascendió a 246.792 Millones de dólares, de los que un 48% se destinaron a esta tecnología, un 13% a combustibles fósiles, un 11% a fusión nuclear y tan sólo un 8% a energías renovables.

Figura 4. Evolución de los Presupuestos de I+D Energético (Países de la AIE¹⁵)

Millones USA\$ (2002)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la AIE & OCDE (2004)

En segundo lugar, la crisis del petróleo de 1973 marcó el punto de partida de una propensión alcista en los presupuestos públicos de I+D destinados a mejorar y desarrollar tecnologías energéticas alternativas hasta que, a principios de los 80, otra importante crisis económica cambió dicha tendencia.

En consecuencia, a partir de 1980 se produjo un retroceso en los presupuestos hasta que, ya entrados los 90, se registran nuevos cambios en las tendencias de ciertas tecnologías. Los presupuestos destinados a tecnologías basadas en combustibles fósiles siguieron reduciéndose durante la pasada década, mientras que los dirigidos a proyectos de eficiencia energética y energías renovables tendieron a aumentar hasta que en 1995 y 1997, respectivamente, superaron el nivel de gasto presupuestado para los combustibles fósiles.

¹⁵ Todas las cifras se ofrecen en dólares de EEUU a precios constantes de 2002 y calculados con tipos de cambio medios de ese mismo año.

A pesar de los mencionados *shocks* ambientales y de mercado, que podrían apuntar hacia paradigmas energéticos más sostenibles, la persistencia en el sector energético de las llamadas tecnologías del carbono conduce a la conclusión de que “la mayoría de economías están ahora atrapadas por las tecnologías basadas en combustibles fósiles” (Green, 1997; p. 106) ¹⁶. En esta línea, Unruh (2000; p.817) sugiere que este *lock-in* se produce mediante “un proceso de coevolución tecnológica e institucional conducido por rendimientos crecientes a escala generadores de sendas dependientes”.

Dicho *lock-in* en las tecnologías del carbono tiene causas complejas que emanan de las interacciones propuestas en el modelo sistémico evolutivo de cambio tecno-institucional (figura 2). Por tanto, “los grandes sistemas tecnológicos (...) deben ser vistos como sistemas complejos de tecnologías inmersas en un poderoso y condicionante contexto social compuesto por instituciones públicas y privadas” (Unruh, 2000; p. 818) que coevolucionan en el tiempo entre sí y con el sistema medio ambiente. Supuestamente consciente de esta coevolución, la OCDE señala que “los gobiernos necesitan promover estilos de vida y tecnologías que alteren las relaciones fundamentales entre la oferta de servicios energéticos y la degradación ambiental” (OCDE, 1999; p. 4).

La ventaja de prácticamente un siglo que las tecnologías basadas en combustibles fósiles tienen sobre otras alternativas en el contexto socioeconómico actual es la causa última del *lock-in* del carbono. El carácter de larga duración y elevados costes de inversión en capital físico propios del sector energético, las economías de escala producidas por sistemas energéticos históricamente integrados verticalmente, la posibilidad de repartir los costes fijos de la I+D en largos periodos de tiempo, y los sistemas de financiación favorecedores de la concentración industrial han determinado, en buena medida, el carácter perseverante de estas tecnologías, cuyo coste unitario de producción ha sido

¹⁶ En este trabajo se consideran “tecnologías del carbono” a todas aquellas que en el proceso de generación eléctrica emiten dióxido de carbono de manera sustancial. Fundamentalmente: las tecnologías de combustión del carbón, petróleo y gas natural. No obstante, resulta necesario matizar en este punto que, en rigor, todas las TER - vistas desde un análisis del ciclo de vida - también emiten dióxido de carbono en mayor o menor medida. Además, la quema de biomasa es una importante fuente de este gas; sin embargo, se considera que el CO₂ emitido por quema de biomasa ha sido anteriormente fijado en igual o mayor cuantía por la planta que la produjo.

reducido hasta extremos que dificultan, de momento, cualquier posibilidad de sustitución vía libre mercado.

En esta dirección cabe señalar que se producen dos problemas adicionales que generan una competencia desigual: 1) el entramado de subvenciones explícitas y ocultas a los sistemas tecnológicos del carbono. Swezey & Wan (2003) citan a los Servicios de Investigación del Congreso de los EEUU: "Dada la gran cantidad de incentivos económicos recibidos históricamente por el equipamiento de tecnologías maduras basadas en combustibles fósiles y energía nuclear, las estructura de las subvenciones existentes distorsiona de manera importante el mercado de la energía en una dirección contraria a las renovables". Por otra parte, Dunn (2001) estima que, globalmente, las subvenciones a los combustibles fósiles suman más de 120 billones de dólares (USA) al año y, 2) la incapacidad del mercado para tener en cuenta todos los costes ambientales producidos por estos sistemas. Sin embargo, éstas son sólo una pequeña parte de las causas explicativas de este fenómeno, pues la paulatina creación y existencia de una extensa red de sistemas e infraestructuras comercial e industrialmente interdependientes, así como los *lobbies* creados por organizaciones y asociaciones capaces de influenciar los poderes públicos, deberían ser consideradas también como fuerzas determinantes de este *lock-in*.

El análisis histórico de Kaiser (1992; p.449) acerca de las políticas nucleares suecas ejemplifica este asunto de forma meridiana: "las compañías energéticas municipales que construyeron plantas de cogeneración fueron castigadas con condiciones desfavorables (...). Por el contrario, las empresas que no tomaron la iniciativa de construir plantas de cogeneración fueron ofrecidas contratos favorables (pero secretos) con precios muy altos. Como resultado, el número de pueblos que construyeron plantas de cogeneración quedo estancado durante la década de los 60. De esta forma, la puerta quedó abierta para que la energía nuclear y la jerarquía del sector eléctrico quedaran intactas".

Por último, mencionar que desde una perspectiva institucional se sugiere que gran parte de las actuales Leyes y Ministerios han sido creados para facilitar la expansión de Complejos Tecno-Institucionales basados en el carbono, hecho que crea barreras capaces de inhibir procesos de inversión alternativos (Unruh, 2000).

HACIA UNA TEORÍA SISTÉMICA-COEVOLUTIVA

“La visión coevolutiva emergente del mundo es dinámica. No sólo está cada subsistema relacionado con todos los demás, sino que además cada uno cambia y afecta la evolución de los otros” (Norgaard, 1992, p. 80).

Las ideas teóricas sobre la coevolución de los sistemas económico y ambiental se producen, primero, como consecuencia de la incapacidad de los modelos neoclásicos para analizar interacciones complejas y, segundo, por la necesidad de tratar temas que inevitablemente exigen visiones interdisciplinarias¹⁷.

El maridaje entre las teorías evolutivas y la economía se remonta, como señala Gowdy (1994; p.105), a “*Veblen*¹⁸, *Schumpeter* y *Georgescu-Roegen*”, y avanza por vías alternativas hasta que, desde la economía ecológica, se formula la necesidad de integrar estas visiones en una teoría coevolutiva del cambio económico (Noorgard, 1992). Esta proposición teórica se fundamenta en una visión del mundo muy distinta de la que cimienta el modelo económico tradicional. Mientras que este último se asienta sobre perspectivas mecanicistas, el modelo co-evolutivo lo hace sobre la base de la biología evolutiva (Mayr, 1982). El modelo coevolutivo hereda pues, las características generales de la ciencia evolutiva (Gowdy, 1994):

¹⁷ “Un enfoque interdisciplinar al medio ambiente sólo puede ser alcanzado por individuos dispuestos a cruzar fronteras disciplinares y aprender el lenguaje de otras disciplinas académicas... la economía ecológica ofrece el potencial para que los individuos sean especialistas en una materia y buenos conocedores de otras perspectivas” (Spash, 1999; p. 432).

¹⁸ En su artículo “Why is Economics Not an Evolutionary Science” de 1898, Thorstein Veblen critica los problemas de la economía clásica y su incapacidad para responder a preguntas básicas de orden dinámico dada su “concepción hedonista del ser humano”, el establecimiento de “casos normales” y enfoques “taxonómicos”. En este sentido, también critica el enfoque mecanicista que subyace al pensamiento económico: “las formas y fines y la estructura de la industria se formulan en una nomenclatura convencional, y los movimientos observados de este aparato mecánico se reducen entonces a un esquema de relaciones normalizado... el resultado del método es, en el mejor de los casos, un conjunto de proposiciones consistentes y lógicas acerca de las relaciones normales de las cosas - un sistema taxonómico. En el peor de los casos, es un conjunto de máximos de conducta de los negocios y una discusión polémica de los aspectos disputados de la política.” (Veblen, 1898; p.5-6). Por otra parte, Veblen dibuja las líneas básicas de los enfoques económicos evolutivos: “...parece que una economía evolutiva debe ser la teoría de un proceso de crecimiento cultural tal y como lo determina el interés económico, una teoría de una secuencia acumulativa de instituciones económicas entendidas en términos del proceso en sí mismo” (Veblen, 1898; p. 10).

- **Carácter único y variabilidad.** El proceso evolutivo es único y se caracteriza por su variabilidad e interdependencia, en la medida en que se produce un equilibrio entre cooperación y relaciones simbióticas. En este sentido, existen múltiples soluciones a los problemas de supervivencia económica o biológica en contextos de presión competitiva. Estos procesos se caracterizan, asimismo, por periodos de relativa calma seguidos por *shocks* y cambios rápidos.
- **Complejidad y organización.** La complejidad en los procesos evolutivos se produce por la masiva red de interacciones que tienen lugar entre los innumerables componentes de un sistema biológico o económico. Los sistemas económicos, señala Gowdy (1994; p.109), son “estructuras complejas de sistemas jerárquicos con un gran número de opciones posibles en cada paso evolutivo”.
- La **indeterminación** procede de las consecuencias de la incertidumbre y el riesgo en los procesos evolutivos. Su tratamiento se considera fundamental en el análisis de políticas de promoción. Concretamente, resulta imprescindible identificar los riesgos que confrontan los inversores y, sobre todo, las incertidumbres causantes de importantes barreras al cambio en sistemas tecnológicos establecidos. En este sentido, es necesario hacer una distinción teórica clara entre incertidumbre y riesgo.
- **Irreversibilidad e irrevocabilidad.** Las leyes de la termodinámica establecen limitaciones sobre los procesos evolutivos. Siguiendo a Georgescu-Roegen¹⁹ (1967), la irreversibilidad se entiende como el proceso entrópico de intercambio energético y significa que siendo éste no reversible, puede pasar por el mismo punto más de una vez. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que los procesos irrevocables son irrepetibles. Ambas características son aplicables a los sistemas biológico y económico.

Los procesos de cambio son universalmente inherentes al espacio-tiempo, y los sistemas socio-institucionales, tecno-económicos y ambientales no son ajenos a esa realidad. Tal y

¹⁹ Referenciado en Gowdy (1994)

como señala Gowdy (1994; p.112) “los sistemas económicos son tan ricos en retroalimentaciones, múltiples vías e interacciones que una descripción completa y por lo tanto una predicción del estado futuro debe ser extremadamente provisional”.

Los contextos de estos procesos de cambio se caracterizan por la incertidumbre y la complejidad. La incertidumbre genera horizontes difusos que imposibilitan la optimización, ya que cambios en las condiciones existentes pueden producirse de manera inesperada e invertir los criterios de selección. Por otra parte, los sistemas complejos se caracterizan por estructuras descentralizadas que se combinan produciendo el comportamiento general normalmente observado del sistema. Este carácter descentralizado faculta de gran flexibilidad ante el cambio a los sistemas complejos, otorgándoles la propiedad de adaptación. Un asunto fundamental a la hora de abordar el análisis de estos sistemas es que las pautas de conducta y propiedades que lo caracterizan no pueden inferirse ni predecirse desde el conocimiento aislado de sus partes. La implicación de esta propiedad emergente para un análisis económico riguroso de procesos tecno-energéticos genera la necesidad de abordar tanto el estudio de los sistemas involucrados, como sus interacciones y capacidades de reacción y adaptación a diversos escenarios.

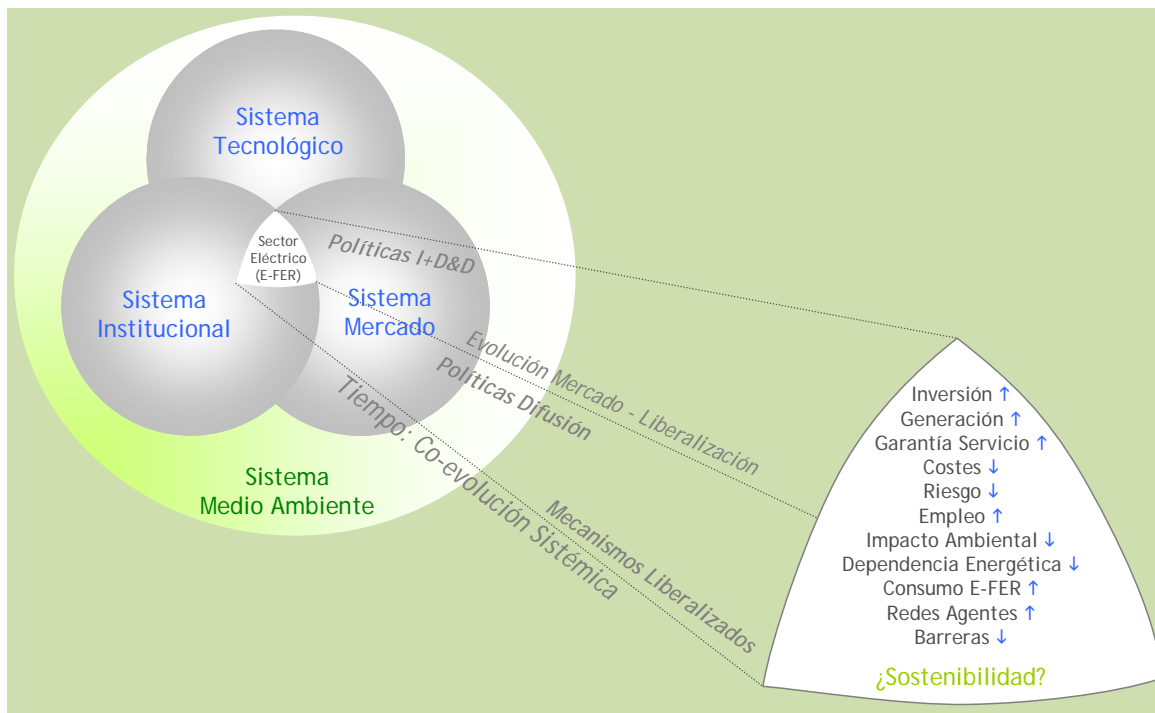
SÍNTESIS TEÓRICA Y DEFINICIÓN METODOLÓGICA

A estas alturas debería resultar obvio que es imposible establecer recomendaciones de política ambiental que emanen de un modelo económico simple que pretenda universalizar relaciones causa-efecto entre política y difusión tecnológica. Por ello, resulta imprescindible adoptar ópticas de análisis que contemplen todas las dimensiones del proceso de cambio - marco institucional y legislativo, situación de la industria tecnológica, nivel de liberalización del sector eléctrico, barreras al acceso de la energía renovable a la red, problemas con las administraciones y otros entes locales, oposición popular, riesgo, incertidumbre, etc. -, y que integren las políticas en un modelo sistémico-coevolutivo que

permita sustantivar su estudio identificando y explorando las fuerzas dinámicas que determinan la consecución de sus objetivos.

La evaluación rigurosa de estas políticas de promoción requiere, pues, la identificación de los sistemas y componentes tecnológicos, institucionales y de mercado que configuran las redes de interacciones y regulan la velocidad y dirección del proceso de cambio tecnológico. El anteriormente aludido fenómeno de *lock-in* en tecnologías del carbono, y las retroalimentaciones sistémicas que lo nutren, deben ser el punto de partida de cualquier análisis acerca de la función y adecuación de las políticas públicas y privadas que pretendan invertir este fenómeno y encaminar el sector energético hacia sendas más sostenibles. En la figura 5 se propone el modelo conceptual sistémico-coevolutivo para el análisis de las políticas de promoción de la energía renovable en el sector eléctrico europeo. En este modelo, se concibe el sector de la E-FER como resultado de la interacción de tres sistemas (tecnológico, institucional y de mercado) que, a su vez, se encuentran incluidos en el más amplio Sistema Medio Ambiente.

Figura 5. Modelo Sistémico-Coevolutivo de Análisis de las Políticas de Promoción



Fuente: elaboración propia

El análisis del sistema tecnológico renovable muestra que las TER se encuentran inmersas en un proceso de adaptación y cambio desde las fases tempranas de la invención-innovación, hasta las más maduras etapas de difusión en los diversos mercados y nichos de mercado. Dados estos distintos estadios de desarrollo y difusión, resulta fundamental definir los instrumentos de promoción que mejor se ajusten a cada situación. En esta línea, Icept & E4tech (2003; p. 15), sostienen que “en un mundo ideal, las políticas serían adaptadas para ofrecer el apoyo requerido en cada estadio (de innovación) para que las tecnologías alcanzaran los criterios de rendimiento ambiental requeridos”. Por tanto, la situación dinámica de las tecnologías debe definir, en cierta medida, el tipo de política de promoción aplicada.

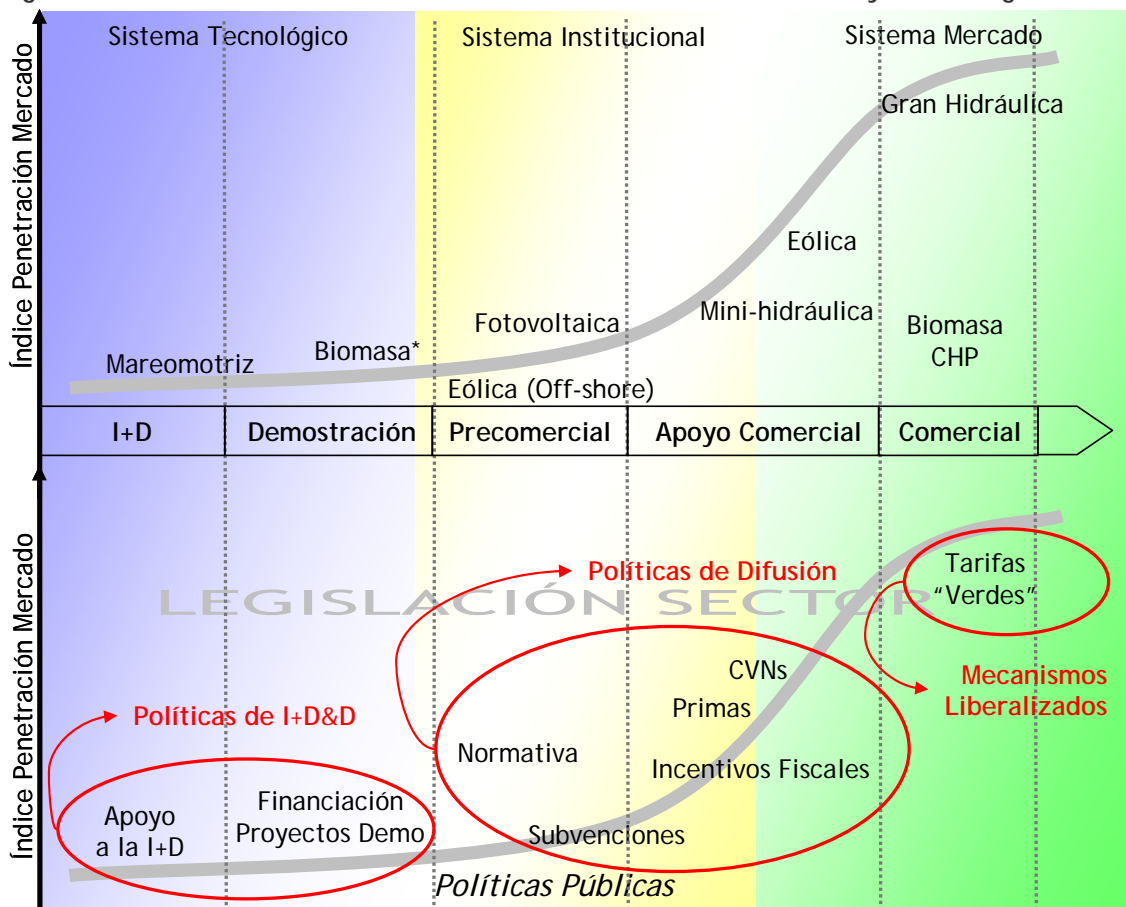
En la figura 6 se ilustra el planteamiento teórico de análisis del proceso de difusión de las TER y el papel de las políticas públicas en este contexto dinámico. En ambos casos se muestra la curva sigmoidea²⁰ insertada en un eje de abscisas definido por las fases del proceso de innovación modificado y en un eje de ordenadas que recoge el nivel de penetración estimativo de las diversas TER en el mercado.

La parte superior del gráfico muestra la situación de las tecnologías en relación con el estadio de difusión en el que parecen encontrarse y su grado de penetración en el mercado. La parte inferior sitúa las diversas políticas de promoción en la misma curva sigmoidea indicando la importancia de diferenciar dinámicamente los diversos instrumentos. En este sentido, las políticas de apoyo a la I+D y la financiación de proyectos de demostración estarían en la frontera de las denominadas políticas de difusión, puesto que su objetivo primordial puede no ser la propagación tecnológica en el mercado. Asimismo, las políticas de difusión de las TER se ciñen con cierta flexibilidad a aquellos incentivos que, por una parte, se sitúan en la fase de difusión del modelo Schumpeteriano y, por otra, tienen como objetivo primordial la propagación de estas

²⁰ La curva sigmoidea es una regularidad empírica del proceso de difusión de nuevas tecnologías a lo largo del tiempo - creciendo lentamente al principio, luego un periodo de rápida expansión, para finalizar con un aminoramiento de la tasa de crecimiento hasta que la tecnología alcanza la madurez y la mayoría de usuarios la han adoptado - (Karshenas & Stoneman, 1995 y Jaffe et al, 2003).

tecnologías en el mercado eléctrico²¹. Por último los llamados mecanismos liberalizados se refieren a sistemas basados en la demanda “verde” de los consumidores.

Figura 6. Modelo Sistémico-Coevolutivo de Análisis de Políticas y Tecnologías



Fuente: elaboración propia a partir de Icept & E4tech (2003)

El carácter sistémico-coevolutivo que caracteriza el proceso de difusión y aprendizaje tecno-institucional obliga a que el análisis de las políticas de promoción de la E-FER (Políticas de I+D&D, Políticas de Difusión y Mecanismos liberalizados) se aborde desde su propio contexto tecnológico (influenciadas por la madurez tecnológica y otras restricciones), institucional (marco normativo, redes de agentes,...), de mercado (nivel de competencia, competitividad, estructura empresarial...) e, incluso, desde una perspectiva socio-económica amplia (preferencias de los consumidores, riesgo de inversores, sistemas de información,...) teniendo en cuenta, además, sus interacciones con otras

²¹ Pese a que en este trabajo el análisis se centra en la difusión de las TER en los mercados eléctricos europeos, podría ampliarse el prisma y abordar el análisis de los incentivos oportunos para desarrollarlas y difundirlas en otros mercados como el de calefacción doméstica, generación de hidrógeno, biocombustibles...etc. A este respecto véase: Joergensen et al (2004).

políticas de carácter transversal y con el medio ambiente (eficiencia energética, reducción de emisiones, política ambiental etc.).

Este marco teórico de análisis se aparta del carácter finalista y estático de los enfoques convencionales en los que las políticas se analizan, casi exclusivamente, desde la perspectiva de su eficiencia y eficacia en alcanzar ciertos objetivos. La aplicación de este último tipo de análisis a situaciones “ex-post” no tiene mayores repercusiones salvo sus propias limitaciones explicativas; sin embargo, su aplicación “ex-ante”, mediante el análisis teórico-abstracto, podría conducir a conclusiones y a recomendaciones de política posiblemente equívocas y sesgadas a favor de los entramados tecno-institucionales establecidos que cuentan con una clara ventaja competitiva.

Por tanto, la cuestión fundamental no debe ser ¿qué tipo de política tiene un menor coste en el corto plazo? y, por tanto, resulta más eficiente (si alcanza sus objetivos); sino, ¿cuál es la influencia que ejercen las diversas políticas en el proceso de cambio tecno-institucional y en la consecución de objetivos prefijados? y, adicionalmente, ¿cuál es su coste/beneficio en el largo plazo? Esto conlleva un tratamiento integral y dinámico que incluya, entre otros: (1) las características de las diversas tecnologías, (2) el contexto socio-económico, (3) el análisis de eficiencia (incorporando “externalidades” y explicitando limitaciones), (4) la evidencia empírica en la consecución de objetivos (análisis ex-post), (5) las interacciones entre una política determinada y los distintos agentes relevantes, (6) la adecuación de las políticas a las diversas tecnologías y sus efectos sobre la competitividad de las mismas, (7) las transiciones de política en respuesta a la reducción de costes tecnológicos y, (8) las consecuencias de un mercado eléctrico único frente a mercados nacionales segmentados.

Es oportuno enfatizar las relaciones entre los diversos tipos de políticas y tecnologías. El punto de partida del sistema eléctrico evidencia una situación de *lock-in* tecno-institucional endémica y el proceso de cambio debe iniciarse con la introducción de políticas de I+D&D

en apoyo de las TER en un marco confuso y espacialmente asimétrico de liberalización del sector (Oxera, 2001). Conforme la liberalización se produce, se abren nuevas oportunidades de negocio que intentan ser rápidamente copadas mediante tecnologías establecidas. Sin embargo, con ayuda de las políticas de difusión, se consiguen crear nichos y huecos en el mercado para la incorporación de las TER, bien mediante la adaptación de los negocios establecidos más flexibles, bien mediante el apoyo a nuevos agentes económicos (pymes, cooperativas...).

Mientras que la primera transición hacia la posible sostenibilidad del sector eléctrico se impulsa mediante el apoyo de la investigación técnica y programas de demostración, las políticas de difusión deben facilitar la introducción de las TER en el mercado eléctrico: (1) aprovechando el impulso de la I+D y potenciando los efectos *spillover* derivados del fomento industrial, (2) reduciendo y atajando las posibles barreras tecno-institucionales y de mercado y, (3) ofreciendo los incentivos oportunos.

Las políticas de difusión se sitúan, pues, en el centro de la discusión actual sobre el desarrollo de las energías renovables en los mercados eléctricos. Puesto que, como hemos visto, las TER se encuentran en distintos estadios de desarrollo, debe presuponerse un marco de incorporación temporalmente asimétrico de las mismas a los mercados. Ello dificulta el análisis teórico de manera considerable, pero también evidencia la necesidad de explicaciones alternativas.

El último paso hacia un sistema eléctrico más eficiente en el que la situación de *lock-in* tecno-institucional en tecnologías del carbono haya sido superada, y la mayor parte del consumo sea abastecido con criterios sostenibles, debe forzosamente pasar por instrumentos de articulación de demanda "verde". Se trata de sustituir las actuales y futuras políticas de difusión por un marco en el que el entramado institucional y de mercado favorezca las tecnologías renovables, y la mayoría de consumidores-ciudadanos, informados de los costes y beneficios a largo plazo de las diversas

alternativas de generación, opten por un consumo consecuente con su bienestar colectivo e individual. La cuestión principal hoy es, por tanto, ¿en qué momento resulta oportuna la transición hacia mecanismos liberalizados? En este trabajo se argumenta que dicha transición no debería producirse hasta haber superado la situación de *lock-in* en tecnologías del carbono.

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de la Energía y OCDE [AIE & OCDE] (2003). *Renewables For Power Generation. Status & Prospects*. Head of Publications Service, OECD. París.
- Agencia Internacional de la Energía [AIE] (2003). *Key World Energy Statistics 2003*. www.iea.org. Washington, D.C. USA.
- Arthur, W.B. (1990). "Positive feedbacks in the economy", *Scientific American* 262:92–95, 98–99.
- Boots, M.G., Schaeffer, G.J., Zoeten, C., Mitchell, C., Anderson, T., Morthorst, P.E., Nielsen, L., Gual, M., Del Río, P., Cadenas, A., Hernández, F., Kühn, I., Bräuer, W. & Stronzik, M. (2000). "InTraCert Inception Report – The Role of an Integrated Tradable Green Certificate System in a Liberalising Market". Netherlands Energy Research Foundation. ECN-C 00-085. The Netherlands.
- Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R. & Norgaard, R. (1997). *An Introduction to Ecological Economics*. CRC Press LLC. EEUU.
- David, P.A. (1985). "Clio and the economics of QWERTY". *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 75: 332-337.
- Dosi, G. (1982). "Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change". *Research Policy*, 11: 147-162.
- Dunn, S. (2001). "Decarbonizing the Energy Economy". Cap. 5 en Brown, L.R.; Flavin, Ch.; French, H.F.; Starke, L. et al. (2001). *State of the World 2001*. A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society. W.W. Norton & Company. New York, USA.
- Faucheux, S. & O'Connor, M. (1999). "Natural Capital and the National Product: a controversial terrain". *International Journal of Development Planning Literature*. Vol 14, nº 2, April-June, 1999, p. 233-273.
- Field, B.C. & Field, M.K. (2002). *Environmental Economics. An Introduction*. McGraw-Hill. Londres. Reino Unido.
- Fink, J. (1988). *The Automobile Age*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

- Flavin, C. & Dunn, S. (1999). "Reinventing the Energy System". En Brown, L.R.; Flavin, Ch.; French, H.F.; Starke, L. et al. (1999). *State of the World 1999*. a Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society. W.W. Norton & Company. New York. USA.
- Freeman, C. (1987). "Japan: a new national system of innovation?" en Dosi, G. et al. (1988). *Technical Change and Economic Theory*. Printers Publishers.
- Georgescu-Roegen, N. (1967). "Economic Theory and Agrarian Economics." In Georgescu-Roegen, N. (1967). *Analytical Economics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Gowdy, J.M. (1994). *Coevolutionary Economics: The Economy, Society and the Environment*. Kluwer Academic Publisher. EEUU.
- Green, C. (1997). "The Greenhouse Effect and Environmentally Induced Technological Change". En Shionoya Y, Perlman M (ed.) (1997):93-116.
- Gual, M., Hernández, F. & Del Río, P. (2001). "Certificados Verdes Negociables (CVNs). Una alternativa coherente para promocionar la Electricidad a partir de Fuentes de Energía Renovable (E-FER)". *Revista Energía* (157): páginas. Madrid. España.
- Imperial College London Centre for Energy Policy and Technology & E4tech Consulting [Icept & E4tech] (2003). "The UK Innovation Systems for New and Renewable Energy Technologies". A report to the DTI Renewable Energy Development & Deployment Team. U.K.
- Jacobsson, S. & Johnson, A. (2000). "The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research". *Energy Policy* (28)9: 625-640.
- Jaffe A.B., Newell, R.G. & Stavins, R.N. (2003). "Technical Change and the Environment". Chapter 11 in *Handbook of Environmental Economics*, Volume 1, Edited by K.-G. Mäler and J.R. Vincent. Elsevier Science.
- Jaffe, A.B., Newell, R.G. & Stavins, R.N. (2002). "Environmental Policy and Technological Change". *Environmental and Resource Economics* (22): 41-69. The Netherlands.
- Joergensen, K., Kranzl, L., Lopez-Polo, M-A., Stadler, M., Resch, G. & Haas, R. (2004). „Rational use of Energy and Renewable Energy Sources – A review of current policy strategies and promotion schemes". Report of WP1. The Invert Project. Energy Economics Group. Viena, Austria.
- Kaiser, A. (1992). "Redirecting Power: Swedish Nuclear Power Policies in Historical Perspective". *Annual Review of Energy Environment* (17): 437-462.
- Karshenas, M. & Stoneman, O. (1995). "Technological Diffusion". Chapter 7 in Stoneman P. (ed.) (1995). *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change*. Blackwell Publishers, Ltd. UK.
- Kemp, R., Mulder, P. & Reschke, C.H. (2000). "Evolutionary Theorising on Technological Change and Sustainable Development". *OCFEB Research Memorandum 9912*, "Environmental Policy, Economic Reform and Endogenous Technology", Working Paper Series 2.

- Kemp, R., Mulder, P. & Reschke, C.H. (2000). "Evolutionary Theorising on Technological Change and Sustainable Development". *OCFEB Research Memorandum 9912, "Environmental Policy, Economic Reform and Endogenous Technology"*, Working Paper Series 2.
- Kemp, R., Schot, J. & Hoogma, R. (1998). "Regime Shifts to Sustainability through Processes of Niche Formation. The Approach of Strategic Niche Management". *Technology Analysis and Strategic Niche Management* 10: 175-195.
- Kneese, A. & Schultze, C. (1975). *Pollution, Prices, and Public Policy*. Brookings Institution. Washington DC. EEUU.
- Lamy, M.L., Ménanteau, P. & Finon, D. (2002). *The dynamic efficiency of instruments for stimulating the dissemination of renewable energy technologies*. Contribution to the 25th IAEE International Conference "Innovation and Maturity in Energy Markets: Experience and Prospects". Aberdeen, Reino Unido.
- Leontief, W. (1982). "Academic Economics". *Science* (217), p. 104-107
- Loiter J.M. & Norberg-Bohm, V. (1999). "Technology policy and renewable energy: public roles in the development of new energy technologies". *Energy Policy* (27)2: 85-97.
- Martínez-Alier, J. (1990). *Ecological Economics: Energy, Environment and Society*. Basil Blackwell. Oxford. Reino Unido.
- Mayr, E. (1982). *The Growth of Biological Thought*. Cambridge: Harvard University Press.
- Morthorst, P.E. (2000). "The development of a green certificate market". *Energy Policy* (28) 15:1085-1094.
- Nelson, R. & Winter, S. (1977). "In Search of Useful Theory of Innovation". *Research Policy* 6: 36-37.
- Norgaard, R.B. (1992). "Coevolution of Economy, Society and Environment." In Elkins, P. & Max-Neef, M. (ed.). *Real Life Economics*. London: Routledge.
- North, D.C. (1990). *Institution, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge University Press.
- OCDE (1992). *Technology and the Economy. The Key Relationships*. OECD Publications. Paris, France.
- OCDE (1999). *Technology and Environment: towards Policy Integration*. DSTI/STP(99)19/FINAL Head of Publications Service. OECD. París.
- Ogg, L. et al (1986). *Crónica del Siglo XX*. Plaza Janés Editores, S.A., Esplugues de Llobregat. España.
- Oxera (2001). "Electricity Liberalisation Indicators in Europe". Comisión Europea – DG TREN. Oxford, Reino Unido.
- Perkins, R. (2003). *Technological "lock-in"*. International Society for Ecological Economics. Internet Encyclopaedia of Ecological Economics.

- Ruttan, V. W. (2002). "Induced Institutional Innovation". Capítulo 13 en Grübler, A. et al (eds.) (2002). *Technological Change and the Environment*. RFF press. Washington, DC, USA.
- Schaeffer, G.J.; Boots, M.; Martens, Anderson, T., Mitchell, C., Timpe, C., Cames, M. (1999). "The Implications of Tradable Green Certificates for the deployment of renewable electricity". Mid-Term Report. ECN-C-99-072. Petten, The Netherlands.
- Schumpeter, J. (1954). *History of Economics Analysis*. Oxford University Press. Edición española (1982) Editorial Ariel, Barcelona. España
- Soete, L. & Arundel, A. (1993). "An Integrated Approach to European Innovation and Technology Diffusion Policy: A Maastricht Memorandum". Comisión Europea. Sprint Programme. Luxembourg.
- Spash, C.L. (1999). "The Development of Environmental Thinking in Economics". *Environmental Values* (8): 413-435.
- Swezey, B.G. & Wan, Y.H. (2003). *The True Cost of Renewables: An Analytic Response to the coal Industry's Attack on Renewable Energy*. National Renewable Energy Laboratory. Department of Energy. EEUU.
- Unruh, G.C. (2000). "Understanding carbon lock-in". *Energy Policy* 28:817-830.
- Veblen, T. (1898). "Why is Economics not an evolutionary science?". *The Quarterly Journal of Economics* (12).
- Watanabe, Ch., Griffy-Brown, Ch., Zhu, B. & Nagamatsu, A. (2002). "Inter-Firm Technology Spillover and the "Virtuous Cycle" of Photovoltaic Development in Japan". Capítulo 6 en Grübler, A. et al (eds.) (2002). *Technological Change and the Environment*. RFF press. Washington, DC, USA.
- Weber, M. & Dorda, A. (1999). "Strategic Niche Management: A Tool for the Market Introduction of New Transport Concepts and Technologies". IPTS Report, No. 31.