



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Institut de Sostenibilitat IS.UPC

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de Doctorado en Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo

Proyecto de Tesis

**Seguridad energética a largo plazo en la
escala nacional y regional. Evaluación a
partir de modelos de agotamiento del
petróleo y el gas, y metodología para la
evaluación de los mercados eléctricos.**

Juan Martínez Magaña

Departament d'Enginyeria Elèctrica
Escola d'Enginyeria de Terrassa
Universitat Politècnica de Catalunya

Director:

Dr. Martí Rosas i Casals

Departament de Màquines i Motors Tèrmics
Escola d'Enginyeria de Terrassa
Universitat Politècnica de Catalunya

Co-director:

Dr. Carlos de Castro Carranza

Departamento de Física Aplicada
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad de Valladolid

Junio de 2014

Tabla de contenidos

1	TÍTULO Y DATOS DE IDENTIFICACIÓN.....	7
1.1	Título	7
1.2	Datos de identificación	7
2	RESUMEN DE LA PROPUESTA DE TESIS	7
3	DEFINICIONES DE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA	9
3.1	El papel del mercado en la definición de la seguridad energética.....	11
3.2	Las diferentes dimensiones de la seguridad	13
3.3	Propiedades dinámicas de la sostenibilidad de los sistemas	14
3.4	Tres puntos de vista sobre la seguridad energética	16
4	VULNERABILIDADES DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS.	19
4.1	Petróleo	20
4.2	Gas natural.	23
4.3	Carbón.	26
4.4	Producción nuclear.....	27
4.5	Energía hidroeléctrica.	29
4.6	Energías renovables.....	30
5	LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO	31
5.1	Indicadores	32
5.1.1	Indicadores simples	32
5.1.2	Indicadores agregados	34
5.1.3	Otras propuestas de indicadores	35
5.2	Modelos de análisis de la seguridad energética a corto plazo	39
5.2.1	Marco conceptual	39
5.2.2	Indicadores de MOSES.	41
5.3	Modelos de evaluación integrada.	45
5.3.1	Modelos de referencia	45
5.3.2	Marco conceptual	47
5.3.3	Definición operativa de seguridad energética.	47
5.3.4	Sistemas vitales de energía.....	48
5.3.5	Indicadores para evaluaciones a largo plazo	49
6	OBJETIVOS DE LA TESIS	51
6.1	Preguntas de investigación	51
6.2	Objetivos generales y parciales	51
7	METODOLOGÍA	54
7.1	Fuentes de información	54
7.2	Referencias geográficas, temporales y sectoriales	55
7.3	Indicadores de referencia	56
7.4	Los modelos de agotamiento de Hubbert y Laherrere.....	56
7.5	Algunos resultados preliminares	58
8	PLAN DE TRABAJO	69
9	BIBLIOGRAFIA	71

Lista de tablas

Tabla 4.1: Servicios vitales de energía para la evaluación de la seguridad energética.	20
Tabla 4.2: Importaciones de gas natural en los países europeos de la OCDE.	26
Tabla 4.3: Producción de electricidad a partir de fuentes renovables.. . . .	30
Tabla 5.1: Indicadores de referencia.	36
Tabla 5.2: Dimensiones de la seguridad energética evaluados por MOSES.....	41
Tabla 5.3: Valores y dimensiones de los indicadores de seguridad energética.	41
Tabla 5.4: Perfil de seguridad energética del petróleo.	42
Tabla 5.5: Perfil de seguridad energética del gas natural.....	43
Tabla 5.6: Perfil de seguridad energética del carbón.	43
Tabla 5.7: Perfil de seguridad energética de la biomasa y los biocombustibles.	44
Tabla 5.8: Perfil de seguridad energética de la energía nuclear.	45
Tabla 5.9: Sistemas vitales de energía para la evaluación de la seguridad energética.	48
Tabla 5.10: Los indicadores de la seguridad energética a largo plazo.	49
Tabla 7.1: Indicadores de referencia propuestos de forma preliminar.	56
Tabla 7.2: Reservas probadas recuperables de combustibles fósiles.	60

Lista de figuras

Figura 3.1: Cuatro dimensiones de la seguridad energética.	14
Figura 3.2: Cuatro propiedades dinámicas ante una perturbación.	15
Figura 3.3: Cuatro propiedades dinámicas de los sistemas sostenibles.	16
Figura 3.4: Tres puntos de vista sobre la seguridad energética.	18
Figura 4.1: Dependencia de importaciones de petróleo en relación a la población.	22
Figura 4.2: Evolución de las exportaciones mundiales de petróleo.	22
Figura 4.3: Dependencia de importaciones de gas en relación a la población.	25
Figura 4.4: Dependencia de importaciones de carbón en relación a la población.	27
Figura 5.1: Sistemas de energía tratados en MOSES.	40
Figura 7.1: Ciclo de explotación de un recurso agotable.	57
Figura 7.2: Producción de petróleo en EEUU.	57
Figura 7.3: Extracción real de petróleo en Estados Unidos.	59
Figura 7.4: Modelización del proceso de agotamiento de petróleo convencional en Argelia.	63
Figura 7.5: Extracción real de petróleo en el mundo.	65
Figura 7.6: Producción agregada de petróleo convencional en África.	66
Figura 7.7: Producción agregada de petróleo convencional en Asia-pacífico.	66
Figura 7.8: Producción agregada de petróleo convencional en Centro y Sudamérica.	67
Figura 7.9: Producción agregada de petróleo convencional en Europa-Eurasia.	67
Figura 7.10: Producción agregada de petróleo convencional en Medio Oriente.	68
Figura 7.11: Producción agregada de petróleo convencional en Norteamérica.	68
Figura 7.12: Producción agregada de petróleo convencional global.	69

1 TÍTULO Y DATOS DE IDENTIFICACIÓN

1.1 Título

SEGURIDAD ENERGÉTICA A NIVEL NACIONAL Y REGIONAL. EVALUACIÓN A PARTIR DE MODELOS DE AGOTAMIENTO DEL PETRÓLEO Y EL GAS, Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MERCADOS ELÉCTRICOS.

1.2 Datos de identificación

Programa de doctorado: Sostenibilitat, Tecnologia i Humanisme (RD1393/2007)
Instituto universitario de investigación en Ciencia y Tecnologías de la Sostenibilidad (IS.UPC)

Doctorando: Juan Martínez Magaña
DNI: 39.143.456
Departament d'Enginyeria Elèctrica
Escola d'Enginyeria de Terrassa. EET
Universitat Politècnica de Catalunya. UPC

Director de la Tesis: Martí Rosas Casals
Departament de Màquines i Motors Tèrmics
Escola d'Enginyeria de Terrassa. EET
Universitat Politècnica de Catalunya. UPC

Co-director de la Tesis: Carlos de Castro Carranza
Departamento de Física Aplicada
Escuela Técnica Superior de Arquitectura ETSAV
Universidad de Valladolid UVA

2 RESUMEN DE LA PROPUESTA DE TESIS

El concepto de seguridad energética ha estado tradicionalmente asociado al de seguridad de abastecimiento de petróleo y gas, su definición ha evolucionado desde mediados del Siglo XX (Chester 2010) y ha estado influida por diversos acontecimientos o procesos. Los más importantes son el creciente predominio de los combustibles fósiles, los procesos de descolonización, la creación de la OPEP, la creación de la Agencia Internacional de la Energía, las crisis del petróleo de 1973 y 1979, la liberalización de los mercados de la energía, el desarrollo de la energía nuclear, la creciente demanda de energía de los países en desarrollo, la polémica en relación al *peak-oil* y el proceso de agotamiento de los combustibles fósiles, los impactos de la inestabilidad política en países productores, los accidentes y sabotajes en los sistemas de distribución y transporte, y los impactos causados por catástrofes naturales.

Antes de la Primera Guerra Mundial la energía dominante era el carbón, pero en la resolución de la guerra fue decisivo el uso del petróleo, que se convertiría en la principal fuente de energía, no solo para el movimiento del ejército, sino también para la industria y el transporte. También durante la Segunda Guerra Mundial el acceso y el control de los recursos energéticos se convirtió en elemento central de la estrategia de los contendientes (Cherp and Jewell 2011).

Los países se fueron volviendo cada vez más dependientes de los productos derivados del petróleo, no sólo para el transporte de pasajeros, sino también para la producción de alimentos, la atención sanitaria, la industria manufacturera, la calefacción y la generación de electricidad.

El 23 de enero de 1980 Jimmy Carter pronunció un importante discurso ante el Congreso de EE.UU. En él se afirmó que “las crisis en Irán y Afganistán han supuesto una dura lección: nuestra excesiva dependencia del petróleo extranjero es un peligro claro y presente para la seguridad de nuestra nación. La necesidad nunca ha sido más urgente. Por fin, tenemos que tener una política energética clara y completa para los Estados Unidos” (Jimmy Carter 1980). En ese momento 50 ciudadanos americanos permanecían secuestrados como rehenes en la embajada de EE.UU. en Teherán, Irán había bloqueado las exportaciones de petróleo a occidente, desencadenando la llamada segunda crisis del petróleo y las tropas rusas estaban tomando el control de Afganistán a petición de su gobierno.

En estas circunstancias “nuestra posición es absolutamente clara: cualquier intento de cualquier fuerza externa para obtener el control de la región del Golfo Pérsico será considerado como un asalto a los intereses vitales de los Estados Unidos de América, y tal asalto será repelido por todos los medios necesarios, incluida la fuerza militar”. La energía se coloca así en el centro de los intereses vitales de EE.UU. y se interpreta como una cuestión de Seguridad Nacional.

En 2007 el *National Petroleum Council* (NPC) publicó el informe *Facing the Hard Truths about Energy* (LR Raymond, CP Deming 2007), en el que se afirma que el mundo no se está quedando sin recursos energéticos, parte de una visión optimista sobre la situación, pero afirma que existen muchos desafíos complejos que podrían impedir que estos recursos energéticos diversos se conviertan en suministros de energía confiable y suficiente para la gente que depende de ellos.

EE.UU., China, India, Europa, y todas las grandes potencias, así como los pequeños países, necesitan garantizar el acceso al suministro seguro de petróleo y gas natural provenientes de los países productores, pero el mundo está entrando en una etapa histórica en la que es probable que el desarrollo y el comercio internacional de energía sean influenciados más por consideraciones políticas que por el libre juego de los mercados abiertos (Brzezinski 1998; Cherp et al. 2012; Morriss and Meiners 2013; SAFE 2013, 2014). El desplazamiento de la producción mundial de petróleo hacia los países de la OPEP, o la reducción continuada de la capacidad exportadora de la mayoría de los países, hace que el petróleo o el gas puedan ser considerados como un bien estratégico, en el que el valor de uso supere el valor de cambio.

Por otra parte un sistema nacional de energía es una red interconectada compleja en la que una perturbación en un lugar puede causar trastornos en otras partes del mismo, en el que las instalaciones nucleares, también las centrales convencionales, las presas hidroeléctricas, el almacenamiento de combustible nuclear y su transporte, las líneas de transmisión eléctrica, las subestaciones eléctricas, el almacenamiento de gas natural, los gasoductos, el almacenamiento de petróleo crudo y su transporte, las refinerías, los oleoductos y las terminales de carga y descarga, el sistema informático y el sistema de telecomunicaciones, son vulnerable a los ataques intencionales, a los accidentes o a los desastres naturales (Matthew H. Brown, Christie Rewey 2003).

El análisis del “estado de la cuestión” en relación a los temas de seguridad energética se ha desarrollado en este proyecto de tesis en cuatro apartados. En el apartado 3 se aborda la definición del término “seguridad energética”, las diferentes acepciones del término a lo largo de la historia, y sobre todo los diferentes puntos de vistas y significados en función de la escuela de pensamiento y los problemas abordados. Esta definición evoluciona hasta los recientes intentos de integración de los diferentes puntos de vista, buscando abordar la complejidad de la definición. A efectos de esta tesis la definición de la seguridad energética se aborda a partir de la soberanía, la robustez y la resiliencia de los sistemas energéticos.

En el apartado 4 se aborda el análisis de las vulnerabilidades de los sistemas energéticos, en concreto de las principales fuentes de energía: petróleo, gas, carbón, nuclear, hidroeléctrica y otras renovables. Se trata de un estudio que tiene su continuidad en el estudio de los

instrumentos para la medición y evaluación del riesgo, desarrollados en el apartado 5. En él se presentan los principales indicadores e índices agregados utilizados en la medición, así como los últimos avances realizados en la definición de indicadores y el desarrollo de metodologías de evaluación, en el contexto de la *International Energy Agency* y del *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future* (GEA 2012). Se analiza el modelo de evaluación propuesto MOSES, para estudios de la seguridad energética a corto plazo, y se presentan los principales modelos de evaluación integrada utilizados en la modelización de los sistemas energéticos y climáticos.

En el apartado 6 se describen los objetivos de la Tesis a partir de dos preguntas de investigación planteadas: ¿cómo afectará a la seguridad energética el proceso de agotamiento del petróleo y del gas? y ¿cómo contribuye el mercado eléctrico a la seguridad del sistema eléctrico y a la seguridad energética de un país?, y relacionado con ello ¿cuáles son las principales vulnerabilidades e indicadores de riesgo de estos mercados? Estas preguntas sirven de base para la concreción de los objetivos de la tesis, establecidos en el apartado 6.2. La evaluación de la seguridad energética solo será posible abordarla de forma parcial, analizando las implicaciones que tendrá el agotamiento del petróleo y el gas, y sentando las bases metodológicas para el estudio de las implicaciones de los mercados eléctricos en la seguridad energética.

En el apartado 7 se presenta la propuesta metodológica de trabajo junto con algunos resultados preliminares obtenidos en los trabajos desarrollados hasta ahora. En el apartado 8 se presenta el plan de trabajo a desarrollar en los próximos dos años, y en el apartado 9 la bibliografía de referencia.

3 DEFINICIONES DE SEGURIDAD ENERGÉTICA

La definición de seguridad energética ha estado fuertemente marcada por cuatro ámbitos de influencia:

- (1) el debate de la seguridad de suministro, referido esencialmente al abastecimiento de petróleo y gas,
- (2) el debate del papel del mercado en relación a la seguridad de abastecimiento y la fijación de precios,
- (3) el debate sobre la vulnerabilidad de las instalaciones ante accidentes o sabotajes, y
- (4) el debate sobre los costes ambientales y los derechos de acceso. Seguramente esta es la principal causa de la falta de acuerdo en su definición.

El número de amenazas sobre la cadena de suministro energético es enorme (Winzer 2012). Se pueden distinguir tres grandes tipos: los riesgos técnicos, los riesgos humanos y los riesgos naturales. Las diferencias entre los conceptos de seguridad energética dependen de la forma en que los expertos seleccionan las amenazas que consideran en su análisis.

En 1990 la Comisión Europea (European 1990) definía la seguridad energética como “la capacidad para asegurar que las futuras necesidades energéticas esenciales puedan ser satisfechas, tanto por medio de recursos internos suficientes y en condiciones económicamente aceptables, como haciendo uso de fuentes externas accesibles y estables, complementadas en su caso, por las reservas estratégicas”.

En 1994 la definición se completaba en el libro verde sobre política energética para Europa (Commission 1994), afirmando que el concepto incluye la seguridad física, la seguridad económica y la continuidad del suministro. Y que todos estos aspectos tienen un papel que desempeñar en la calidad del servicio prestado a los usuarios. Esta definición es matizada según su dimensión temporal; la seguridad a corto plazo abarca la capacidad de evitar interrupciones en el suministro a los usuarios, debido a los cortes provocados por circunstancias excepcionales,

lo que afecta principalmente el petróleo y el gas; y la seguridad a largo plazo se define como la capacidad de la industria de la energía para garantizar un suministro fiable, económico y suficiente en el largo plazo.

En el año 2000 se alcanza un fin de ciclo de estabilidad en los precios del petróleo que se mantenía desde mediados de la década de 1980. El libro verde *Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético* (Commission 2001), publicado en esa fecha afirma que “está aumentando la demanda de energía tanto en la Unión Europea como en los países candidatos”, básicamente de fuentes de energía convencionales (petróleo y gas natural), y está aumentando también la demanda de fuentes de energía importada, o lo que es lo mismo la dependencia exterior. Los riesgos que deben de ser asumidos por Europa tienen dimensiones físicas, económicas, medioambientales y sociales, y es posible que se produzcan interrupciones de suministro de corto plazo, de largo plazo o incluso permanentes, de una o varias fuentes de energía, o de uno o varios combustibles. Desde el punto de vista económico Europa es vulnerable no solo en relación al abastecimiento, sino también a los cambios en los precios de la energía.

En esas nuevas condiciones el objetivo de seguridad energética debe tratar de asegurar el bienestar de los ciudadanos y el buen funcionamiento de la economía, la disponibilidad física continuada de productos energéticos en el mercado, a un precio asequible para todos los consumidores (particulares e industriales), dentro del respeto a las exigencias ambientales y en la perspectiva de desarrollo sostenible, que ha fijado el Tratado de la Unión Europea.

De esa definición de contexto se deriva la política energética europea, que se concreta en una amplia gama de objetivos y medidas que podrían agruparse en cinco grandes ámbitos (Commission 1994):

- (1) el mercado,
- (2) la eficiencia energética,
- (3) las infraestructuras y la capacidad de respuesta ante las crisis,
- (4) el acceso a los recursos internos (limitar la dependencia de las importaciones) y
- (5) el acceso a los recursos externos (gestión de los riesgos de importación).

Por tanto la seguridad energética tiene una definición multidimensional (Chevalier 2006):

- el abastecimiento ha de ser fiable, desde fuentes de energía primaria propias o proveedores externos,
- debe de ser abundante, dentro de un marco de competencia, y basado en la diversificación,
- las redes de transporte deben estar físicamente disponibles, en relación a mantenimiento, inversiones, fiabilidad de funcionamiento y rutas alternativas y
- la distribución de la energía debe de hacerse de manera eficiente, de forma continua, con el nivel de calidad establecido, sin discriminación, y
- a un precio razonable, lo que significa fijado por el mercado en relación a los costes marginales.

Y también admite definiciones sociales, en relación a la equidad social y los derechos de acceso (pobreza energética), o en relación a las opciones de acceso (balanza comercial y capacidad de compra). O definiciones militares relacionadas con el control de los recursos, en las que el acceso a los recursos (control de las fuentes) se considera una cuestión de seguridad nacional, por otra parte la capacidad de defensa de la soberanía está también relacionada con la seguridad de suministro, por lo que el poder sobre los recursos suele estar relacionado con el poder militar.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) fue fundada en 1974 con el mandato de implementar una estrategia conjunta en la gestión de la seguridad del petróleo a escala internacional. En ese momento se atravesaba una situación difícil a nivel internacional. La gestión de la emergencia es uno de los principales pilares de la IEA, para ser miembro de la

OCDE se requiere de dos obligaciones fundamentales: mantener las reservas de petróleo estratégicas en un equivalente a 90 días de importaciones netas de petróleo, y mantener las medidas de respuesta a emergencias que puedan contribuir a una acción colectiva de la IEA, en caso de una interrupción grave del suministro de petróleo. Estas medidas de respuesta incluyen reservas, restricción de la demanda, sustitución de combustibles, aumento de la producción de petróleo y, en su caso, el reparto de los suministros de petróleo disponibles (IEA 2007).

La definición de la seguridad energética de la Agencia Internacional de la Energía ha evolucionado a lo largo de los años, en 1985 se definía como “un adecuado suministro de energía a un costo razonable” (IEA 1985). En 1993 las discusiones sobre seguridad crecían en complejidad, “la diversidad, la eficiencia y flexibilidad en el sector de la energía son condiciones básicas para la seguridad energética a largo plazo: los combustibles utilizados y las fuentes de esos combustibles deben de ser lo más diversas posible. Los sistemas de energía deben de tener la capacidad de responder de forma rápida y flexible a las emergencias energéticas” (Berrah, Noureddine; Feng, Fei; Priddle, Roland; Wang 2007), la cooperación y las acciones colectivas, la mejora de la eficiencia energética, las nuevas tecnologías energéticas, un mercado eficiente y un marco seguro para las inversiones, son consideradas como las condiciones necesarias para la seguridad energética.

3.1 El papel del mercado en la definición de la seguridad energética

La definición de la seguridad energética está fuertemente influenciada por el rol que se asigna al mercado respecto a esta seguridad, hay esencialmente dos puntos de vista: los que consideran que la seguridad es el resultado del funcionamiento del mercado, y los que consideran que el mercado es una de las instituciones que condicionan la seguridad, pero no la única (Chester 2010).

La definición de la seguridad energética centrada en el mercado sostiene que las políticas de seguridad deben de estar destinadas principalmente a “hacer que los mercados funcionen” y “dejarlos trabajar cuando lo hacen” (Noël 2008). Este enfoque aboga firmemente por un papel limitado para los gobiernos y la política. Los mercados de energía deben de operar “libremente”, la producción y los precios deben de ser el resultado de la competencia, la asequibilidad y la sostenibilidad resultarán de forma natural de un mercado “sin restricciones”, y la seguridad se pondrá en peligro si los gobiernos intervienen. Desde esta visión el precio de mercado refleja la disponibilidad de energía y por lo tanto el costo de la seguridad del suministro. La disponibilidad es “para aquellos que estén dispuestos a pagar el precio de mercado”, o que estén en condiciones de hacerlo.

Según esta definición la competencia garantiza la estabilidad sistémica en los mercados y garantiza una asignación óptima de los recursos entre las necesidades. Este tipo de mercado perfecto se basa en varios supuestos que suponen una cierta contradicción con la realidad: los consumidores se comportan racionalmente y están perfectamente informados sobre todas las alternativas disponibles, los costos de transacción son cero, el equilibrio económico general es único y estable, y los precios se transfieren a velocidades infinitamente rápidas.

De estas contradicciones se deriva el llamado “paradigma institucionalista” que asigna un papel mucho más activo al estado en relación con el mercado. Se trata de una visión diferente que sitúa el mercado como una más de las instituciones, formales e informales, que conforman el capitalismo. “Todas las instituciones, incluido el mercado ... se definen en relación con la estructura de los derechos y obligaciones de los actores relevantes” (Chang 2007), que en el caso del mercado incluye los arreglos institucionales que determinan y/o regulan la participación, los derechos y las obligaciones, por lo que el mercado, como todas las

instituciones, lejos de ser “naturales”, “son el fruto de acontecimientos sociales e históricos complejos”, no alejados de la política (Coriat and Weinstein 2005).

Los defensores del mercado como centro de la seguridad afirman que Europa debería de promover un tratamiento multilateral de la seguridad energética, y procurar que los mercados mundiales de la energía funcionen de forma eficaz, garantizando que cada proveedor tenga el derecho a buscar el precio más alto y cada importador el derecho de buscar el mejor negocio (Keppler 2007). Es necesario distinguir entre el nivel de los precios de la energía, la velocidad a la que cambian y la libertad de suministro, en una situación de recursos limitados y crecimiento de la demanda, el incremento de precios se presenta como inevitable, pero si se mantiene la igualdad de derechos de acceso de todos los importadores, el crecimiento económico y el progreso tecnológico asegurarán que los precios aumentan gradualmente.

Es por eso que la primera preocupación debería de ser que los mercados sean transparentes y respondan a la nueva información de forma racional, determinados más por la actividad económica y la tecnología, que por acontecimientos políticos o militares, sabotajes o intereses corporativos, nacionales o especulativos. La segunda preocupación debería de centrarse en promover la eficiencia energética, las energías renovables y la internalización en los precios de los impactos ambientales, los riesgos de suministro y la volatilidad.

Desde esta óptica la reducción absoluta de los parámetros de riesgo es de interés limitado, y lo importantes es cómo se limitan y redistribuyen los efectos económicos y sociales de estos riesgos, para lo cual el mercado se considera la mejor herramienta. La independencia energética, entendida en el sentido de aislamiento del sistema internacional, es considerada un objetivo obsoleto e incluso peligroso, no en el sentido de la reducción de la dependencia que es una estrategia de seguridad.

Según J. H. Keppler (2007), Europa es un actor cualificado para la negociación de un sistema de comercialización de energía multilateral, en el que no pueden faltar los grandes actores globales como OPEP, Rusia, China, India o EEUU, y no duda en considerar que los acuerdos entre Europa y Rusia deberían de insertarse en una lógica comercial global, antes que en acuerdos bilaterales a largo plazo, por tanto han de asentarse más en una base económica que política.

La propia construcción europea se ha fundamentado en la articulación de un mercado común, definido en los diferentes tratados que le dan forma a lo largo del tiempo, París (1951), Roma (1957), Maastricht (1993) y Lisboa (2007). Y se ha trabajado intensamente en la construcción de un mercado común interior de la energía, con resultados importantes en el financiamiento de programas para fomentar nuevas tecnologías energéticas, el fomento de la eficiencia energética y la contención de la dependencia del petróleo y el gas, en la gestión de reservas estratégicas de emergencia, el diálogo con terceros países y en la definición de objetivos comunes en materia de energía y cambio climático, este proceso fue favorecido durante las décadas de 1980 y 1990 por la relativa tranquilidad en relación al abastecimiento y la estabilidad de precios.

Pese a ser un objetivo ya trazado en 1988 (Commission 1988), Europa aún no ha desarrollado unos mercados interiores de la energía plenamente competitivos (Commission 2006), el papel nacional lejos de disminuir se ve reforzado por el incremento de los precios y las preocupaciones por la seguridad energética en la década del 2000. “El estancamiento en la aplicación de las normas y medidas propuestas podría obstaculizar el buen funcionamiento del mercado interior de la energía y ocultar las señales que indican la conveniencia de crear nueva capacidad, lo que desalentaría la inversión y daría lugar a futuras deficiencias de suministro. En tales circunstancias podría además dificultarse el acceso al mercado de nuevos competidores, incluidos los que ofrecen una energía más limpia” (Commission 2007).

La falta de avances en el desarrollo del mercado eléctrico se concreta en la negación de algunos países a separar verticalmente los servicios de electricidad en compañías de distintos

propietarios responsables de las funciones de producción, distribución y comercialización. Los argumentos esgrimidos en contra de la propuesta fueron su impacto en la seguridad de suministro, pues romper los actuales oligopolios nacionales debilitaría su poder de negociación con los proveedores externos. Esto supone un serio cuestionamiento a la relación de dependencia establecida por la Comisión Europea entre mayor competencia y una mayor seguridad de abastecimiento.

En el ámbito exterior la estrategia europea en relación a las negociaciones con Rusia están orientadas a la creación de una asociación que ofrezca seguridad y previsibilidad a ambas partes, allane el camino de las necesarias inversiones a largo plazo en nueva capacidad y facilite un acceso justo y recíproco a los mercados y a las infraestructuras, incluido el acceso de terceros a los gasoductos y oleoductos. Y más allá de eso Europa apuesta por la creación de un “espacio común de reglamentación” con normas comunes en materia de comercio, tránsito y medio ambiente, que hiciera posible la creación de un mercado previsible y transparente que estimularía la inversión y el crecimiento, así como la seguridad de abastecimiento. Una comunidad paneuropea de la energía definida a través de un nuevo tratado y de acuerdos bilaterales, con los países del Magreb, Argelia en particular, Turquía, Ucrania y los países de la Europa Sudoriental.

Los avances en esta dirección son escasos y todo apunta a un nuevo proceso de afirmación del “nacionalismo energético” (Mcgowan 2008), tanto en África Subsahariana, en América Latina, en Asia Central, o particularmente en Rusia y Argelia, de las cuales depende el 46,4% de las importaciones de petróleo y el 43,2% de las importaciones de gas de la Unión Europea (BP 2013).

Contrariamente a los objetivos marcados por J.H. Keppler (Keppler 2007), Europa orienta cada vez más su política exterior en función de una seguridad de abastecimiento basada en acuerdos políticos, y no tanto en la libre actuación de mercados globales desregulados.

3.2 Las diferentes dimensiones de la seguridad

De lo expuesto en los apartados anteriores podrían deducirse cuatro elementos fundamentales en la definición de la seguridad. Concretados por la *Asia Pacific Energy Research Centre* (APEREC 2007), en un intento de sintetizar las diferentes dimensiones tratadas en la literatura científica:

- (1) la *disponibilidad* de energía, en relación a la existencia física de recursos,
- (2) la *accesibilidad*, en relación a la capacidad o control geopolítico suficiente para garantizar el acceso a las fuentes de recursos,
- (3) la *asequibilidad*, en relación a la capacidad para pagar los precios de mercado, y
- (4) la *aceptabilidad*, en relación a las implicaciones ambientales y sociales relacionadas con la obtención de los recursos.

A modo de observación indicar que, si bien estos cuatro elementos recogen una parte significativa del debate, hay algunas dimensiones de la seguridad que quedan recogidas de forma limitada. También indicar que estos conceptos podrían ser extendidos de forma general a la evaluación de la seguridad en la prestación de cualquier otro servicio, de hecho en el ámbito de la salud el estudio del acceso a los servicios toma en consideración cinco factores: asequibilidad, disponibilidad, accesibilidad, alojamiento y aceptabilidad (Penchansky and Thomas 1981; Wyszewianski 2002). No obstante se trata de un intento de síntesis que contiene elementos de gran interés para este estudio.

La Figura 3.1 representa estas cuatro dimensiones sobre ejes de coordenadas y las correlaciona con las dos trayectorias posibles a escala global propuestas por el *Clingendael International Energy Programme* (CEIP 2004; Hoogeveen and Perlot 2005), la de *mercados e instituciones*

que representa un mundo integrado en lo económico y político, con instituciones internacionales multilaterales eficaces y con mercados globales, y la de *regiones e imperios* que dibuja un mundo dividido en bloques rivales, que compiten por los recursos y los mercados a través de la economía, la política y el poder militar. En el primer caso se reducirían las tensiones geopolíticas y las preocupaciones relacionadas con la dependencia, y estas se centrarían en garantizar las inversiones y la disponibilidad suficiente. Seguramente en un mundo así los costes de producción física podrían ser más importantes, por la mayor demanda. En el segundo caso se produciría un aumento de la competencia entre regiones y aparecerían barreras políticas, lo que reforzaría la idea de la independencia energética y la preocupación central sería la accesibilidad a los recursos.

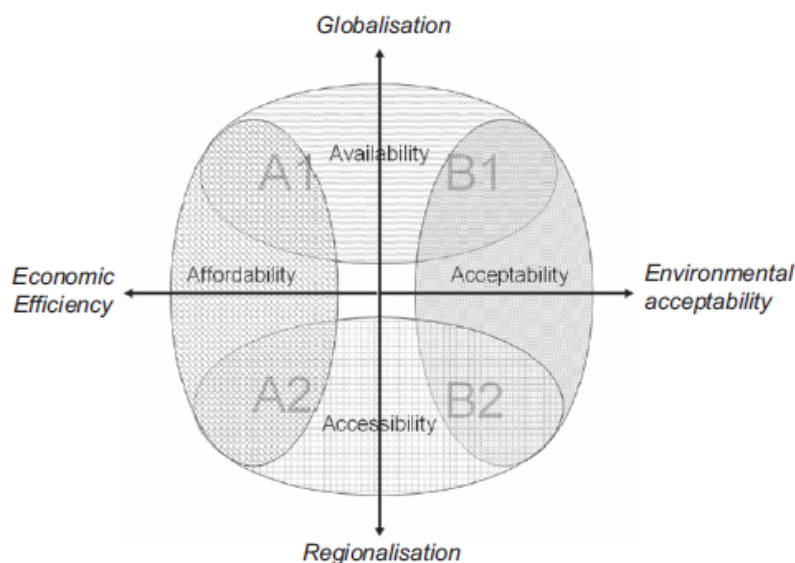


Figura 3.1: Cuatro dimensiones de la seguridad energética en relación a las tendencias globales. Fuente (Kruyt et al. 2009)

En la figura anterior también se ponen de manifiesto las tensiones entre los objetivos económicos y ambientales. El objetivo de bajos costos de la energía con el fin de facilitar el crecimiento de la economía choca con las consecuencias ambientales y el agotamiento físico de las reservas, que implicará un incremento de costes a largo plazo. Estas diferentes opciones fueron recogidas en los escenarios de referencia definidos en el Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (IPCC 2000), los escenarios A1 y B1 ponen el acento en el multilateralismo, la globalización y el funcionamiento de las instituciones internacionales (disponibilidad), y en el A2 y B2 predomina la regionalización, la geopolítica y el conflicto (accesibilidad), por otra parte A1 y A2 ponen el énfasis en el mercado, los bajos costes y el crecimiento económico (asequibilidad), mientras que B1 y B2 proponen la atención en la adaptación tecnológica y estrategias de inversión y respuesta a los problemas globales (aceptabilidad).

3.3 Propiedades dinámicas de la sostenibilidad de los sistemas

La Comisión Brundtland definió en 1987 el desarrollo sostenible como “aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (UN 1987), esta definición se sustenta sobre tres objetivos:

- (1) el bienestar humano,
- (2) la equidad social y
- (3) la integridad del medio ambiente

Desde una visión de la sostenibilidad estos tres objetivos son determinantes a la hora de evaluar las vulnerabilidades o la seguridad (Stirling 2009). La Cumbre Mundial para el Desarrollo Social de 2009, definió la sostenibilidad no en clave de satisfacción de necesidades sino como “el marco de nuestros esfuerzos para lograr una mejor calidad de vida para todas las personas” (UN 1995).

En su análisis de las vulnerabilidades Stirling presta especial atención a dos dimensiones: temporalidad y tipo de acción. En función de la temporalidad, clasifica las perturbaciones en función de su duración; se refiere a “*shocks*” episódicos (ver Figura 3.2), en relación a una perturbación transitoria con efectos más o menos devastadores pero de corta duración, lo que dará lugar a un período de adversidad y recuperación también de duración limitada, si el sistema tiene capacidad para ello, y se refiere a “*stress*” cuando las perturbaciones son persistentes en el tiempo o de duración prolongada, lo que implica efectos a largo plazo sobre el sistema, y también respuestas prolongadas en el tiempo relacionadas con la mitigación, la adaptación, y el cambio en el sistema.

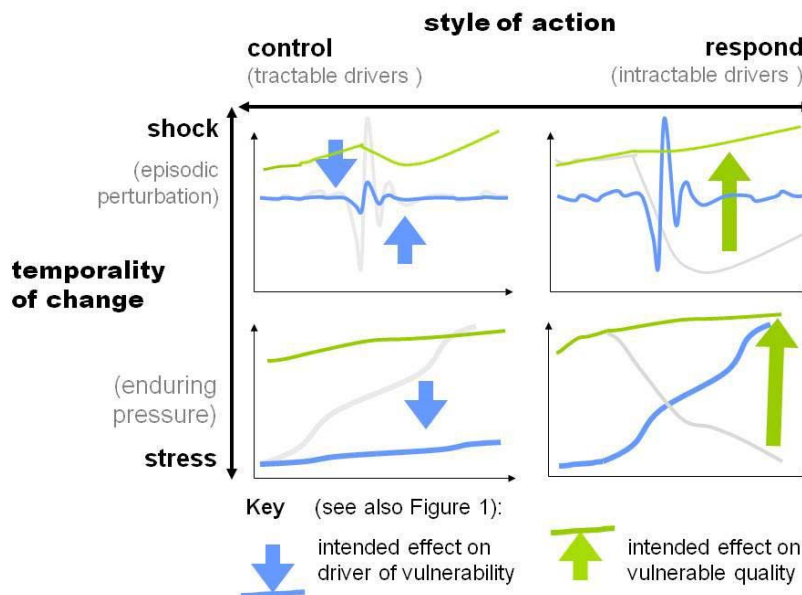


Figura 3.2: Cuatro propiedades dinámicas de la temporalidad y las respuestas ante una perturbación. Fuente (Stirling 2009)

Cuando la perturbación es tratada como “*shock*”, las reacciones tienen como objetivo conservar la estructura, las funcionalidades y las tendencias evolutivas del sistema, esperando que se restablezcan las condiciones anteriores al este (White and Stirling 2013). Y cuando son tratadas como “*stress*” las respuestas han de orientar los procesos de adaptación a las nuevas circunstancias, introduciendo los cambios necesarios para preservar la evolución del sistema.

La segunda dimensión es el tipo de acción, las clasifica también en dos tipos. La acción es de “control” cuando está dirigida hacia la fuente de la perturbación, es decir cuando actúa sobre las causas de la perturbación. La acción es del tipo “respuesta” cuando la actuación se dirige solo a mitigar los efectos de la perturbación. La acción del tipo control presupone capacidad para manejar el proceso de la perturbación, lo que requiere de confianza en un diagnóstico acertado de las relaciones causales y de los instrumentos apropiados, el tiempo y los recursos necesarios para intervenir, y también de la confianza en que las consecuencias de tales intervenciones se

limitarán a lo que se desea y espera. Por tanto las acciones de tipo control se aplican a perturbaciones que podrían ser clasificadas como “tratables”.

La acción en modo “respuesta” se aplica ante perturbaciones intratables, y está más orientada a paliar los efectos; puede estar justificada cuando las relaciones causales sean indeterminadas o impredecibles, cuando las capacidades, el tiempo o los recursos no sean suficientes para hacer manejables las intervenciones, o cuando los esfuerzos y las implicaciones sean prohibitivas.

La combinación entre la temporalidad de las perturbaciones y los tipos de acción crea cuatro posibilidades, que a su vez podrían ser definidas como las cuatro propiedades de los sistemas que determinan la sostenibilidad de estos:

- (1) La “estabilidad” de un sistema es el resultado de su capacidad para desarrollar acciones que controlen las causas de los *shocks* (ver Figura 3.3),
- (2) la “resiliencia” del sistema se define como una propiedad dinámica basada en la generación de respuestas eficaces ante los efectos de los *shocks*,
- (3) la “durabilidad” depende de la capacidad para controlar las causas que crean situaciones de estrés en el sistema, y
- (4) la “robustez” del sistema se refiere a la capacidad del sistema para generar respuestas que limiten los efectos del estrés sobre el sistema.

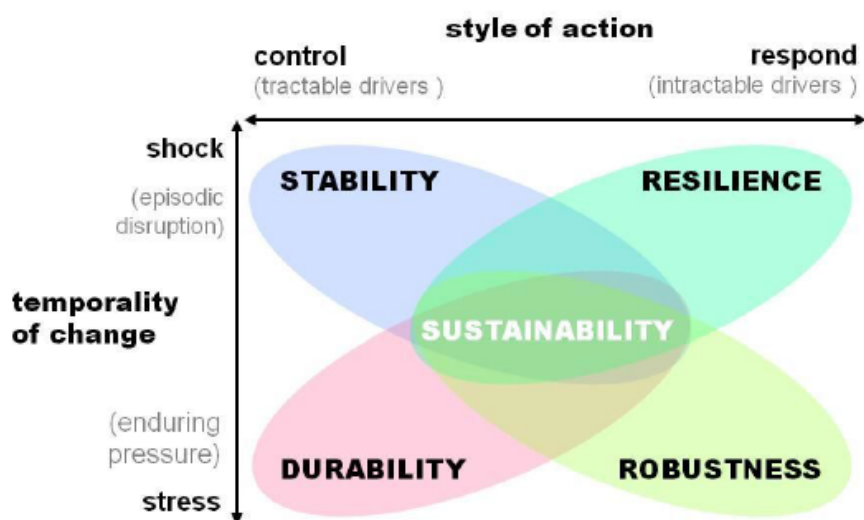


Figura 3.3: Cuatro propiedades dinámicas de los sistemas sostenibles. Fuente (Stirling 2009)

Desde el punto de vista de la sostenibilidad la valoración de las propiedades dinámicas del sistema está ligada a los fines y motivaciones del propio sistema. Por tanto una evolución positiva debe de serlo en relación a las mejoras de los grupos más vulnerables de la sociedad, en relación al bienestar humano, la equidad social y la integridad del medio ambiente (Stirling 2009).

3.4 Tres puntos de vista sobre la seguridad energética

En general las definiciones de la seguridad energética son ambiguas y varían según la perspectiva y la posición en la cadena de abastecimiento. Los consumidores y las industrias se preocupan por la continuidad en el servicio y los precios razonables, los países productores se preocupan por la seguridad y la estabilidad de los ingresos; las compañías de petróleo y gas priorizan el libre acceso a nuevas reservas y la garantía de las inversiones; los países en desarrollo están preocupados por la capacidad de pago de los recursos imprescindibles para su

desarrollo y las implicaciones sobre las balanzas de pago y la deuda; las compañías eléctricas se preocupan por la estabilidad y la integridad de las redes de distribución; los gobiernos se centran en los riesgos de la interrupción del suministro y la seguridad de la infraestructuras debido al terrorismo, la guerra o los desastres naturales (WEF 2006). Esos diferentes puntos de vista ha llevado a que a lo largo de la historia la seguridad energética haya sido definida y analizada desde tres ópticas diferentes (Cherp and Jewell 2011):

- (1) una perspectiva de la “soberanía” con sus raíces en la ciencia política, en la que la seguridad de suministro está asociada a una visión geopolítica de la garantía de abastecimiento de petróleo y gas,
- (2) una perspectiva de la “robustez” con sus raíces en las ciencias naturales y la ingeniería, basada en la fiabilidad de los sistemas de producción y distribución de energía, y
- (3) una perspectiva de la “resiliencia”, con sus raíces en la economía y el análisis de sistemas complejos, centrada en el análisis de mercados y la garantía de funcionamiento.

La perspectiva de la soberanía se asienta sobre el análisis de las tensiones internacionales relacionadas con la seguridad de abastecimiento de combustibles fósiles, las diferentes amenazas y riesgos que se derivan de ello, tanto en el ámbito de la producción y el control de los recursos, como en la seguridad de las rutas de transporte, ver Figura 3.4. Su objetivo es asegurar un suministro suficiente de petróleo y otros combustibles para los servicios vitales de energía a nivel nacional. Los actores principales que participan en este ámbito de estudio son los relacionados con las ciencias políticas, las políticas públicas, las teorías de la seguridad, y en particular la seguridad nacional, las relaciones internacionales y la diplomacia, y los estudios de gobernanza. Las actuaciones pasan por la protección y el control de los sistemas, la construcción de relaciones de confianza con los proveedores, la diversificación de proveedores y rutas, el uso de recursos propios y la provisión de reservas de emergencia.

La perspectiva de la robustez toma en consideración dos aspectos fundamentales de la seguridad, la disponibilidad de recursos y la vulnerabilidad de los sistemas técnicos complejos. En el primero se integrarían las teorías sobre los límites, principalmente relacionadas con las capacidades limitadas del planeta en relación al espacio y los recursos, las teorías del *peak-oil* sobre la preocupación por el comportamiento de las reservas de combustibles fósiles y más importante si cabe el comportamiento de la producción. En este apartado entrarían también los estudios relacionados con el cambio climático, las implicaciones que se derivan y las posibles respuestas. El segundo aspecto abarca los aspectos técnicos relacionados con la seguridad de las instalaciones, los accidentes nucleares y la proliferación nuclear, la vulnerabilidad de las infraestructuras a sabotajes, ataques terroristas, fenómenos naturales y/o fallas técnicas, y los impactos en la producción y distribución de energía, especialmente eléctrica. La actuación pasa por el uso de tecnologías seguras, fuentes con recursos abundantes y por la adecuación de los sistemas, también por aquellas que mejoren la resiliencia del conjunto.

La perspectiva de la resiliencia se asienta principalmente en el estudio de los mercados a través de las teorías económicas. Entiende la energía como una mercancía o un bien de mercado y la desregulación, la liberalización y la diversidad de actores en el mercado como la base de la seguridad de abastecimiento. Cree que los mercados pueden garantizar la inversión necesaria en infraestructuras de energía y entregar energía de manera más eficiente y segura que los mercados regulados. Esta visión economicista vincula conceptos como “precio”, “accesibilidad” o “bienestar económico” con la definición de “seguridad de suministro”, a través de frases como “disponibilidad de suministro suficiente a precios asequibles”, o “la pérdida de bienestar económico que puede ocurrir como resultado de un cambio en el precio o la disponibilidad de la energía”. Trata los problemas definidos como perturbaciones transitorias impredecibles, relacionados con las perturbaciones de mercado, los cambios tecnológicos, las variaciones climáticas o los cambios regulatorios. Sus estrategias de respuesta a los riesgos de

abastecimientos se basan principalmente en la diversificación de tipos de energía y proveedores, y en la distribución de los costes derivados de la asunción de riesgos en mercados competitivos, en la descentralización, la redundancia de equipos y en las capacidades de reserva.



Figura 3.4: Tres puntos de vista sobre la seguridad energética. Fuente (Cherp and Jewell 2011)

Teniendo en cuenta que de forma genérica todo el sistema se verá beneficiado por la mejora en la intensidad energética, la diversificación y la I+D, y que los mercados son excelentes en la gestión de riesgos cuantificables, pero deben confiar en los gobiernos para proporcionar un seguro para riesgos inciertos no cuantificables. Estas tres visiones acaban formulando preguntas que deben de ser respondidas:

- (1) Desde la soberanía se trata de saber ¿quién controlará los barriles restantes? y si ¿tendrán las naciones que ir a la guerra para proteger el acceso a estos recursos?,
- (2) desde la robustez, se trata de identificar ¿la cantidad de petróleo que queda?, y lo ¿lo difícil que será conseguirlo?, y
- (3) desde la resiliencia la pregunta central es si ¿serán la economía mundial y el sistema de energía capaces de adaptarse a una producción de petróleo en declive?

El principal desafío planteado por Cherp y Jewell (2011) consiste en avanzar hacia la integración académica y política de estas tres perspectivas. Esta integración es una tarea compleja, ya que cada punto de vista se basa en su propio idioma, métodos, discursos y marcos conceptuales. Acercarse a la tarea de desarrollar un campo interdisciplinario de los estudios de seguridad energética podría empezar con establecer los límites del campo de estudio, formular las preguntas centrales de investigación e identificar los métodos y marcos teóricos de referencia.

4 VULNERABILIDADES DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

La vulnerabilidad de un sistema es el grado en que ese sistema es incapaz de hacer frente a perturbaciones o eventos adversos. Como no es posible considerar todos los eventos posibles la selección de estos debe de regirse por criterios como la probabilidad, la criticidad y los daños. La criticidad de un evento está relacionada con la baja resiliencia del sistema para esa perturbación, lo que indica que la elección de acontecimientos críticos debe de estar guiada por el análisis de las debilidades del sistema (Gnansounou 2008). La vulnerabilidad de un sistema también puede definirse como “una combinación de su exposición a los riesgos y la capacidad de recuperación, es decir, su capacidad para responder a las interrupciones (Jewell, Cherp, and Riahi 2014a).

Los riesgos pueden ser clasificados en tres grandes categorías (Winzer 2012):

- (1) Riesgos técnicos, que son el resultado de fallos en los sistemas de producción o transporte, debidas a problemas mecánicos o eléctricos, a problemas de control o comunicación, o a errores humanos.
- (2) Riesgos humanos, producidos por fluctuaciones en la demanda, retención estratégica de suministros, falta de inversión en nueva capacidad, sabotajes, actos terroristas, riesgos geopolíticos, guerras, embargos, etc.
- (3) Riesgos naturales, interrupciones estocásticas de las fuentes renovables, agotamiento de reservas y desastres naturales.

Aunque podrían considerarse otras dimensiones de la vulnerabilidad como la intensidad energética de la producción, los precios de la energía, la dependencia de las importaciones, la proporción de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, la vulnerabilidad de suministro de electricidad o la diversidad en los combustibles de transporte (Gnansounou 2008), estos son elementos que pueden hacer vulnerable una economía o una sociedad.

En el marco de esta Tesis la clasificación de los problemas asociados a la vulnerabilidad ha de tomar en consideración las tres dimensiones de la seguridad energética (soberanía, robustez y resiliencia). Los problemas han de estar situados en su escala nacional o supra-nacional. Jessica Jewell clasifica estos problemas (ver Tabla 4.1) para los llamados servicios vitales (ver Tabla 5.9), se trata de una clasificación desarrollada dentro del marco del informe GEA, que será considerada de referencia para la tesis.

Tabla 4.1: Servicios vitales de energía para la evaluación de la seguridad energética. Fuente (Cherp et al. 2012; Jewell, Cherp, and Riahi 2014a).

Subsistemas energía	Dimensiones de la seguridad energética		
	Robustez	Soberanía	Resiliencia
Nivel global			
Mercado global de combustibles: petróleo, carbón, y gas	La disponibilidad de recursos y reservas	Participación en el comercio internacional y en la producción global	Dominación de un combustible en la mezcla total mundial de PES ¹
		Concentración geográfica de la producción de combustibles	
Ciclo del combustible nuclear		Concentración geográfica de enriquecimiento de uranio, la fabricación de componentes de plantas de energía nuclear y el reprocesamiento del combustible nuclear	
Nivel nacional			
Fuentes de energía			
Combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón	Reservas nacionales disponibles (relación R / C)		
	Crecimiento de la demanda para un combustible en particular	Dependencia de las importaciones	Diversidad de las rutas de importación
Energía hidroeléctrica	Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua	Uso de los recursos hídricos transfronterizos	Diversidad de las presas hidroeléctricas
Generación y transmisión de electricidad	Edad del conjunto de plantas de energía Crecimiento del consumo de energía eléctrica Confiabilidad (frecuencia de los apagones) Tasa de acceso	Dependencia de los combustibles importados	Diversidad de los combustibles utilizados para la producción de electricidad Diversidad de las plantas de energía
Sectores de uso final: industria, transporte, residencial y comercial, las exportaciones de energía	Crecimiento (disminución) en la demanda de energía para cada sector	Dependencia de los combustibles importados dentro de cada sector	Diversidad de las fuentes de energía utilizadas en cada sector
Sistemas nacionales de energía (intersectorial)	Intensidad energética Crecimiento en el consumo total de energía Consumo de energía per cápita	Dependencia total de importaciones	Diversidad global de PES utilizadas en el sistema energético nacional

4.1 Petróleo

El petróleo es un recurso no renovable, que representa el 31,5% de la demanda global de energía primaria y el 36,1% en los países de la OCDE, el 32,5% es producido en Oriente Medio y el 21,7% en países de la OCDE. Ordenados de mayor a menor por producción, exportaciones y consumo, los 10 primeros países de la lista concentran el 64% de la producción, el 71% de las exportaciones y el 75,6% de las importaciones (IEA 2013). Las reservas mundiales estimadas son de 223.454 Mtoe², y el consumo anual de 3.973 Mtoe en 2011, lo que resulta en un ratio R/P de 56 años (WEC 2013).

Los problemas principales en relación al petróleo son los siguientes (Cherp et al. 2012):

¹ Primary energy sources

² Million tons oil equivalent

- Relacionados con la robustez

- (1) *Aumento de la demanda.* Entre 2002 y 2012 la demanda global de petróleo ha crecido en un 13,5%, a razón de 1,27% anual, ha pasado de 78,5 Mbd³ a 89,8 Mbd, lo que ha supuesto un incremento en 490,3 Mtoe (BP 2013). El 48,2% de la nueva demanda corresponde a China, que la ha incrementado en un 95% en ese período. En las previsiones de futuro hasta 2035 del *New Policies Scenario* de la IEA (IEA 2013), la demanda entre 2012 y 2035 se incrementará en un 16%, hasta alcanzar los 101,4 Mbd, los países de la OCDE reducirán su demanda en 8,0 Mbd, y los No-OCDE la incrementarán en 19,6 Mbd, de los cuales 10,5 Mbd corresponden a China e India.
- (2) *Incremento de los costos de explotación y desarrollo.* Entre 2002 y 2012 los costos de los equipos, instalaciones, materiales y personal (calificado y no calificado) se han incrementado en un 221, 1%, según indica el *Upstream Capital Costs Index (UCCI)*, y los costos de operaciones de los campos de petróleo y gas se han incrementado en un 83,7% según el *Upstream Operating Cost Index (UOCI)*, dos índices elaborados por *Information Handling Services (IHS)* y el *Cambridge Energy Research Associates (CERA)*, (CERA 2014) .
- (3) *Alza de precios y volatilidad.* El precio medio anual del barril de Brent ha pasado de 24,99 \$/bbl en 2002 a 108,56 \$/bbl en 2013, en precios reales, lo que significa un incremento del 434% (EIA 2014), a precios constantes este incremento es del 349% (BP 2013). La desviación estándar de los precios crece entre 2,8 en 2002 y 29,5 en 2008, coincidiendo con un máximo del precio en los meses de junio y julio de ese año, en los que la cotización del barril alcanzó los 132 \$, desde entonces los precios medios anuales continuaron subiendo pero la desviación ha ido bajando hasta un valor de 4,3 en 2013, esto indica un alza notable de los precios y una mayor variabilidad que en 2002, aunque esta se ha moderado entre 2011 y 2014.

- Relacionados con la soberanía

- (1) Dependencia de las importaciones. Más de tres mil millones de personas viven en 83 países que importan más del 75% del petróleo y productos derivados que consumen, y 101 países con 5300 millones de personas importan más del 25% del petróleo (Cherp et al. 2012).

El estudio de la Figura 4.1 se ha realizado para 81 países en los que viven 5.988 Mp⁴, de los 7.044 contabilizados a nivel mundial en el informe de 2014 del World Bank. De esta población 990 Mp viven en países que cubren la demanda con producción nacional, 427 Mp dependen de importaciones ente el 0% y el 25%, 340 millones dependen entre un 25% y un 50%, 4.229 Mp dependen más del 50% y 2.455 Mp dependen más del 75%. La dependencia media de toda la población estudiada es del 56,4%.

³ Million barrels per day

⁴ Millones de personas

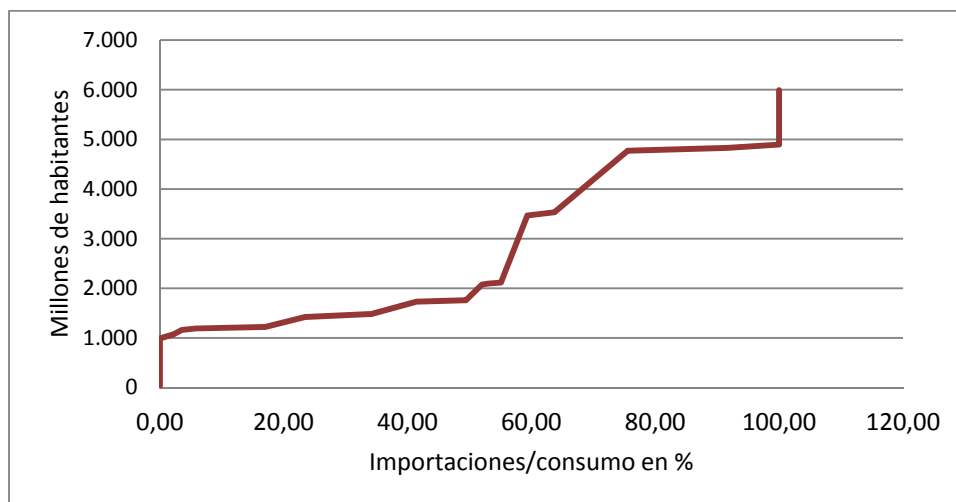


Figura 4.1: Dependencia de importaciones de petróleo en relación a la población. Elaboración propia, datos (BP 2013; WB 2014).

- (2) *Poder de mercado cada vez mayor de los principales productores.* Las exportaciones se concentran cada vez más en los principales países productores de la OPEP, la dependencia de estos países alcanzó un 64% en 1993 para luego entrar en una ligera disminución hasta el 58% en 2002, e iniciar un nuevo periodo de ascenso hasta el 64% en 2012. La situación se agrava si se toma en consideración que del 36% del petróleo exportado por países No-OPEP en 2012 (ver Figura 4.2), el 16% corresponde a las exportaciones de Rusia y el 5% a las exrepúblicas soviéticas (Turkmenistan, Azerbaijan y Kazakhstan).

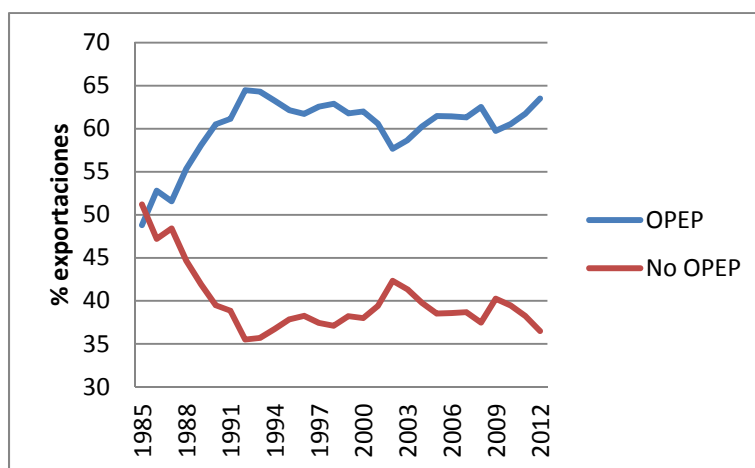


Figura 4.2: Evolución de las exportaciones mundiales de petróleo, entendidas en valor neto (producción-consumo). Elaboración propia, datos (BP 2013).

- Relacionados con la resiliencia

- (1) *Predominio del petróleo en el consumo de energía.* Los productos del petróleo representan también el 40,8% de la energía final a nivel global y el 47,8% para la OCDE. Es el 92,6% del consumo en el sector transporte, el 12,2% en la industria y el 14,1% en otros sectores.

- (2) *Falta de sustitutos fácilmente disponibles para el petróleo en el sector del transporte.* Los tiempos de vida económica y física de los sistemas de transporte existentes se miden en escalas de tiempo de décadas. Dado que las tasas de rotación son bajas, el cambio rápido en los niveles de consumo del sector transporte es intrínsecamente imposible, para los vehículos de motor, aviones, trenes y barcos, simplemente no hay otra alternativa de combustibles líquidos. El valor del capital actual asociado al transporte en EE.UU., requeriría entre 25 y 30 años para ser reemplazado. Por lo que los equipos de energía más eficientes sólo serán aplicados gradualmente, las consecuencias del *peak-oil* probablemente acelerarán las tasas de reemplazo, pero la transición requerirá décadas y supondrá billones de dólares de costo (Hirsch, Bezdek, and Wendling 2005).
- (3) *Diversidad limitada de las rutas mundiales de suministro de petróleo.* La evaluación del riesgo externo ha de considerar de forma sistemática toda la cadena de suministro, formada por tres etapas principales; la etapa de la dependencia externa, que tiene que ver con la determinación de las importaciones de petróleo y las fuentes de importación de acuerdo con las demanda; la etapa de alimentación externa que se refiere a la disponibilidad de los proveedores; y la etapa de adquisición externa, que se refiere a la estabilidad de adquisición en los aspectos económicos y de transporte (H.-Y. Zhang, Ji, and Fan 2013). Han de ser consideradas cuatro dimensiones del riesgo, relacionado con la dependencia externa (riesgos de dependencia), con la estabilidad de la oferta (los riesgos de suministro), con la economía del comercio (riesgos económicos) y la seguridad del transporte (riesgos de transporte).
- (4) *Vulnerabilidad de los puntos de estrangulamiento “chokepoints”.* El bloqueo de uno de los cuellos de botella existentes, aunque sea temporalmente, puede provocar aumentos sustanciales en los costos totales de energía y ruptura en las cadenas de suministro (Z. Zhang 2011). Los más críticos son el estrecho de Ormuz, que conecta el Golfo Pérsico con el mar Árabe, por el circulan 15,5 millones de bbl/d⁵, un tercio del comercio marítimo, el estrecho de Malaca entre Indonesia, Malasia y Singapur, la principal ruta de abastecimiento del Golfo Pérsico a los mercados asiáticos, circula un flujo de 13,6 millones de bbl/d. Otros son el Canal de Suez, el Estrecho de Bab el-Mandeb, el Estrecho de Bósforo o el Estrecho Danish, aunque no son los únicos (EIA 2012).

4.2 Gas natural

El gas natural es también un recurso no renovable, que representa el 21,3% de la demanda global de energía primaria y el 25,7% en los países de la OCDE, el 15,8% es producido en Oriente Medio, el 35,8% en países de la OCDE, y el 25,3% en países de Eurasia no OCDE (IEA 2013). Las reservas mundiales estimadas son de 209,742 bcm, y la producción anual de 3.518 bcm, lo que resulta en un ratio R/P de 59 años (WEC 2013).

Es un combustible que ha ganado una importancia creciente en las economías emergentes. Se utiliza ampliamente en la producción de electricidad, en el sector residencial, en muchas aplicaciones industriales y en menor escala en el transporte y en usos no energéticos. La producción está también concentrada en unos pocos países y regiones, la mayoría de las naciones dependen de las importaciones. Hay, sin embargo, diferencias importantes entre las preocupaciones de seguridad energética entre el petróleo y el gas natural.

⁵ Barrels per day

Entre 2002 y 2012 la demanda global de gas natural ha crecido en un 31,4%, a un ritmo de 2,8% anual, más del doble que el petróleo. En los países de la OCDE el crecimiento ha sido del 1,5% anual, acumulando un incremento del 15,8%, en los países No-OCDE el incremento del consumo ha sido del 50,0%, a un ritmo del 4,1% y en Europa la demanda ha disminuido a un ritmo del 0,2% anual.

El crecimiento en Asia ha sido del 6,8% anual, en África del 5,8%, en Medio Oriente del 6,6% y en Latinoamérica del 5,0%. La producción anual de gas se sitúa en 3.033,5 Mtoe, 754,4 Mtoe más que en 2002 (BP 2013). En las previsiones de futuro hasta 2035 del *New Policies Scenario* de la IEA (IEA 2013), la demanda entre 2012 y 2035 se incrementa en un 47,7%, en este período los países de la OCDE aumentarán la demanda a un ritmo del 0,7% anual, y los No-OCDE lo harán a un ritmo del 2,3%, lo que implica un crecimiento global medio del 1,6% por año. En Asia el crecimiento medio será del 4,2% anual.

El incremento de los costos de explotación y desarrollo de los yacimientos de gas natural, es el mismo que para el petróleo, de hecho en la confección de los índices UCCI y UOCI intervienen explotaciones tanto de gas como de petróleo.

Los precios del gas siempre se han relacionado a los precios del petróleo (con frecuencia los precios en los contratos a largo plazo para la entrega por gasoducto están indexados al precio del petróleo) (Keppler 2007). Durante los últimos diez años los precios del gas se han incrementado notablemente, al tratarse de un combustible con una componente regional mucho mayor que el petróleo, los precios también se determinan en esta escala, en Norteamérica los precios se incrementaron entre 2002 y 2008, para luego caer por debajo de los precios iniciales, en Europa los incrementos han estado alrededor de un 350% con diferencias según los países.

En los informes de BP son estudiados 77 países en relación a la producción y el consumo de gas natural, en 33 de ellos la producción es superior a la demanda y por tanto la dependencia es nula, en ellos viven 1.550 Mp, 2.757 Mp viven en países con dependencias entre 0% y el 30%, entre ellos se encuentran EEUU, China e India, entre el 30% y el 75% de dependencia viven 467 Mp, y con más del 75% hay 799 Mp. La dependencia media en los países estudiados es del 28,9%.

Observamos en la Figura 4.3 que la dependencia de las importaciones de gas natural son notablemente inferiores a las de petróleo, en este caso 4.750 Mp, el 80,5% de los 5.890 Mp que viven en los países relacionados con la producción y el consumo del gas, lo hacen en países con niveles de dependencia de las importaciones inferiores al 30%, lo que indica una menor vulnerabilidad. Que se está incrementando con el crecimiento del consumo.

El GNL⁶ incrementa las opciones de diversificación de abastecimiento. A diferencia de lo que ocurre con el petróleo, el gas natural se comercializa en ámbitos regionales y se distribuye principalmente a través de gasoductos, su comercialización depende fundamentalmente de acuerdos bilaterales a largo plazo. Mientras que los intercambios de petróleo entre regiones alcanzaron en 2012 al 66,1% del consumo global, en el caso del gas natural esta cifra asciende al 31,2% del consumo, de esta cantidad el 21,3% corresponde a intercambios por gasoducto, realizados entre países de una misma región o entre países próximos de regiones diferentes, los intercambios de GNL son el 9,9% del consumo, en este caso la facilidad de transporte hace que estos intercambios se realicen a cualquier escala.

El consumo en forma de GNL permite una mejor diversificación de las fuentes, es el caso de Japón que utiliza esta forma de aprovisionamiento de gas natural, procedente de 19 proveedores diferentes, a una escala menor Corea del Sur utiliza una estrategia similar. En Latinoamérica solo algunos intercambios entre Brasil, Bolivia y Argentina se hacen por gasoducto, el resto se

⁶ Gas natural licuado

hace con GNL. En Norteamérica la mayoría de intercambios se hacen por gasoducto, y el GNL se utiliza para diversificar el abastecimiento. En Asia la inmensa mayoría de los intercambios se hacen mediante GNL, pero en la medida que crece la demanda esto tiende a cambiar, se están reforzando las conexiones entre Rusia, las exrepúblicas rusas, China y otros países de Asia.

En 2012 los países europeos de la OCDE importaron 446,5 bcm⁷ de gas natural, de ellos el 84,5% fueron entregados a través de gasoductos y el resto en forma de GNL. Rusia aportó el 34,5% de las importaciones por gasoducto y el 28,3% vinieron de Noruega, Argelia aportó el 8,7% de las importaciones por gasoducto y el 20,8% de las de GNL, Qatar también juega un importante papel en las importaciones con el 44,9% de las importaciones de GNL. Europa significa para Rusia el 65,1% de sus exportaciones de gas, pero esa dependencia recíproca tenderá a cambiar en la medida en que se establezcan las interconexiones necesarias entre Rusia y el mercado Chino.

Entre 2007 y 2012 la producción de gas de esquistos en EEUU ha pasado de 1,3 bcf⁸ a 10,4 bcf, y las reservas han crecido hasta 129,4 tcf⁹ aproximadamente, el 40% de las reservas de gas, en un proceso conocido como la “revolución del gas de esquisto” y basado en la utilización de las técnicas de fracturación hidráulica y perforación horizontal. Este proceso tiene importantes consecuencias para la seguridad energética no sólo en Estados Unidos, sino también en el resto del mundo. Hay preocupaciones sobre las estimaciones de costos, las bajas tasas de recuperación y sobre los impactos ambientales de las explotaciones.

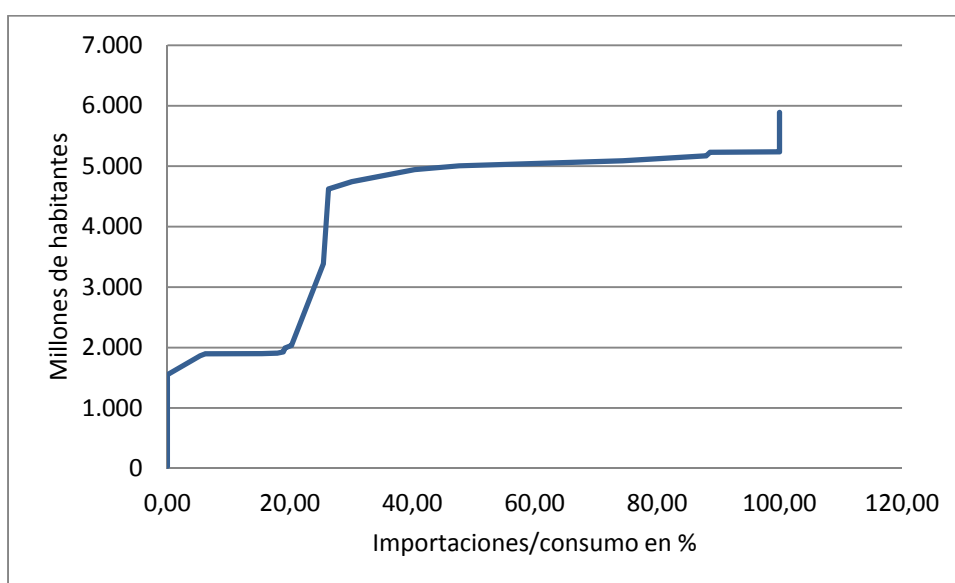


Figura 4.3: Dependencia de importaciones de gas en relación a la población. Elaboración propia, datos (BP 2013; WB 2014).

Las reservas estimadas son muy importantes, sobre todo en EEUU, Sudamérica y Asia, las posibilidades en Europa son limitadas y se concentran en los países del norte. Sobre el posible traslado de estas técnicas a Europa y su implicación en la seguridad energética, las expectativas son bastante limitadas, tanto por las diferencias geológicas, la falta de ventajas fiscales, la falta de tecnologías y conocimientos, un medio ambiente natural y cultural más sensible, la posible

⁷ Billion cubic meters

⁸ Billion cubic feet

⁹ Trillion cubic feet

oposición de las comunidades locales, y los elevados costes de inversión (Cherp et al. 2012). Sin embargo ya hay operaciones en Polonia, Francia, Alemania, Suecia y Austria.

Tabla 4.2: Importaciones de gas natural en los países europeos de la OCDE. Fuente (BP 2013).

Trade movements 2012	bcm	%
Import pipeline		
Russian Federation	129,97	34,5
Norway	106,64	28,3
Netherlands	54,51	14,5
Algeria	32,78	8,7
Other	53,25	14,1
Total imports	377,16	100,0
Import LNG		
Qatar	31,09	44,9
Algeria	14,42	20,8
Nigeria	11,64	16,8
Other	12,01	17,3
Total imports	69,28	100,0

Otras fuentes de gas no convencional en desarrollo, con reservas significativas, son el gas de grisú (*coalbed methane*) asociado a los yacimientos de carbón, los gases confinados en depósitos de difícil acceso (*tight gas*), y los hidratos de metano disponibles en aguas profundas en diversas partes del mundo (WEC 2013).

4.3 Carbón

El carbón es también un recurso no renovable, representa el 28,8% de la demanda global de energía primaria y el 19,5% en los países de la OCDE, el 45,3% de la producción mundial corresponde a China, también son productores importantes: EEUU, India, Indonesia, Australia y Rusia, de ellos solo Indonesia y Australia son exportadores significativos. Casi el 63% del consumo está destinado a la producción de electricidad y calor, y un 24% es utilizado en el sector industrial. Por lo general la producción de carbón se destina al consumo nacional y pocos países no productores tienen consumos significativos, como es el caso de Japón y Corea del Sur (IEA 2013). Las reservas mundiales estimadas son de 891.530 Mt¹⁰, y el consumo anual de 7.520 Mt en 2011, lo que resulta en un ratio R/P de 118,5 años (WEC 2013).

Entre 2002 y 2012 la demanda global de carbón creció en un 54,7% a un ritmo del 4,5% anual, con una clara diferenciación entre países, los países de la OCDE disminuyeron su consumo en un 6,9% y los países No-OCDE incrementaron su demanda en un 109%, aunque esta no es una valoración acertada ya que el 90,2% de la nueva demanda fue en realidad generada por dos países, China que ha incrementado su consumo a un ritmo del 9,9% anual, con un crecimiento total del 157,2%, e India que ha crecido a un ritmo del 7,0% anual, dando lugar a un crecimiento del 96,5% (BP 2013). El crecimiento de la demanda de China que en estos momentos se hace sobre producción nacional, podría derivar en un incremento de la dependencia exterior a medio plazo, dado que la relación R/P es tan solo de 34 años.

La dependencia media de las importaciones en los países estudiados es del 32,1%, superior a la del gas, contrariamente a lo que cabría suponer, las diferencias esenciales entre estos dos tipos de energía son, por un lado, que China tiene una dependencia significativamente menor, un 2,6%, frente a una dependencia del 25,5% del gas, pero el volumen de población que tiene una dependencia superior al 50% es para el gas del 14,2% y para el carbón del 26,8%.

¹⁰ Millones de toneladas

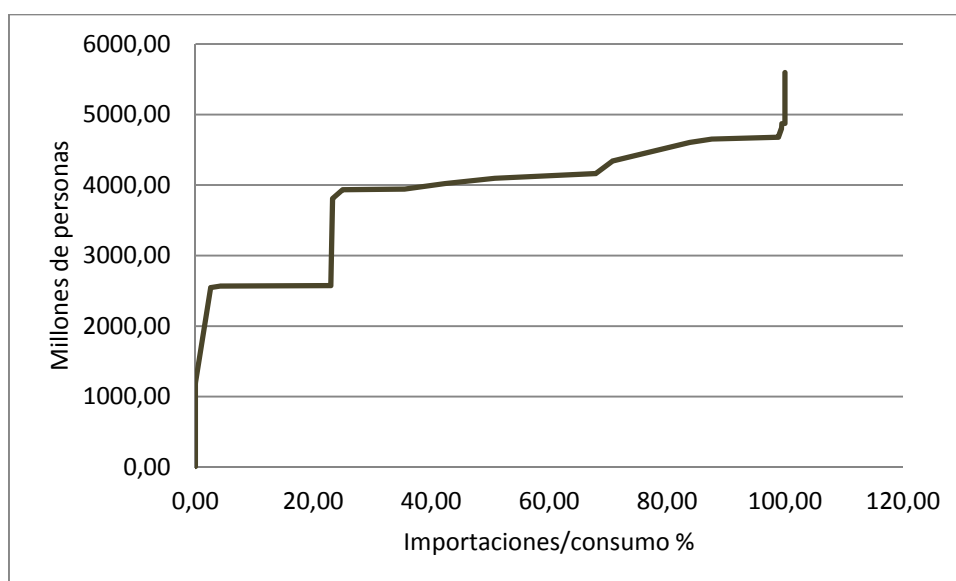


Figura 4.4: Dependencia de importaciones de carbón en relación a la población. Elaboración propia, datos (BP 2013; WB 2014).

La dependencia principalmente de producción nacional significa que el suministro de carbón es menos propenso a ser perturbado por razones geopolíticas que en el caso del petróleo. Sin embargo, la producción de carbón puede ser retrasada debido a sus importantes costes ambientales y para la salud. Las políticas globales de cambio climático pueden afectar a la asequibilidad del carbón dependiendo de la evolución de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

4.4 Producción nuclear.

La producción de electricidad de origen nuclear ha disminuido entre 2002 y 2012 en un 8,2%, en los países de la OCDE la disminución ha sido del 15,3%, y en los No-OCDE se ha producido un incremento del 34,8% (BP 2013), la caída indicada corresponde principalmente a las consecuencias para la producción eléctrica del accidente de Fukushima en Japón.

En 2011 la energía nuclear aportó un 11,7% de la producción eléctrica, un 19,3% en los países de la OCDE, y un 25,1% en Europa, lo que supone un nivel de dependencia importante desde el punto de vista de seguridad de abastecimiento (IEA 2014). Como situaciones significativas destacar la producción en Francia del 75,9% de la electricidad, el 45,5% en Ucrania y el 37,1% en Suecia.

En 2012 había 437 reactores nucleares en operación en todo el mundo, con una capacidad de 372 GW, más del 80% de la capacidad es en los países de la OCDE, el 11% en Europa oriental y Eurasia, y del 8% en países en desarrollo. De los 73 GW en construcción alrededor del 80% se encuentra en países fuera de la OCDE (IAEA 2012). La producción mundial de uranio se ha incrementado en un 12,5% desde 2008 y la relación entre reservas y producción (R/P) se ha incrementado hasta una duración superior a 100 años (NEA/IAEA 2012).

Japón producía en 2010 el 25,3% de su mix eléctrico con energía nuclear, pero como consecuencia del accidente de Fukushima su producción se ha reducido de 292,4 TWh¹¹ en esa fecha a 18,0 TWh en 2012, hoy en día ninguno de sus 54 reactores está en funcionamiento. Los

¹¹ Tera vatio hora

costos crecientes de las instalaciones nucleares y los extensos tiempos de aprobación requeridos para nuevas construcciones han tenido un gran impacto en la industria nuclear, la desaceleración no ha sido global, en los nuevos países, sobre todo en las economías en rápido desarrollo de Medio Oriente y Asia, siguen adelante con sus planes de establecer una industria nuclear.

Las preocupaciones por la seguridad energética más apremiantes para la energía nuclear en la mayoría de los países son las preocupaciones de robustez relacionados con la edad y la obsolescencia de sus programas, combinados con la falta de inversión reciente. Los países con plantas envejecidas habrán de resolver el dilema entre invertir los recursos necesarios para poner en marcha una industria obsoleta o reorientar los recursos para llenar el vacío que el envejecimiento de las centrales nucleares abrirá. Es por ello que la energía nuclear se enfrenta a retos importantes de robustez en casi tres cuartas partes de los países en los que es utilizada (Cherp et al. 2012).

Actualizando a 2014 la edad media de todos los reactores en marcha es de 28,9 años, 45 reactores están operando con edades superiores a 40 años, el 50% de los reactores tienen edades superiores a 30 años, y el 75% edades superiores a 25 años (IAEA 2013). Si bien los países pueden extender las licencias de explotación de sus centrales nucleares existentes, se plantean problemas de seguridad, especialmente en la estela del accidente nuclear de Fukushima.

Otro problema añadido a la operación y ampliación del parque nuclear es la falta de recursos humanos debidamente capacitados. En los próximos cinco años hasta un 35% de la fuerza de trabajo nuclear será jubilada, en el Reino Unido más del 75% de las empresas nucleares informan que tienen problemas para cubrir puestos de trabajo científicos y de ingeniería, y en Alemania en los últimos años no se producen graduados en una disciplina nuclear (Sacchetti 2008).

Desde el punto de vista de la seguridad de abastecimiento la electricidad producida a partir de la energía nuclear ofrece una mayor protección frente a fluctuaciones en los precios de las materias primas, una duplicación en los precios del uranio produce incrementos de costo entre el 5% y el 10%, mientras que para el carbón una duplicación de precios aumenta los costos de electricidad entre un 35% y un 45%, y para el gas puede alcanzar entre el 70% y el 80% (IAEA 2008). El uranio es también un combustible relativamente fácil de almacenar y la recarga de una planta de energía nuclear en general, proporciona combustible para dos o tres años de funcionamiento. Pero debe de considerarse que el necesario proceso de enriquecimiento del uranio está limitado a unos pocos países, lo que significa una dependencia que puede afectar a la soberanía. El conflicto con Irán sobre el control del enriquecimiento, conecta con el doble uso del uranio y los riesgos de proliferación nuclear. También hay que considerar que la tecnología nuclear se concentra en unas pocas empresas de ocho países, por lo que la dependencia tecnológica será inevitable.

Por otra parte existen riesgos significativos de seguridad de la energía nuclear asociados con sus características tecnológicas, económicas e institucionales. Para la energía nuclear los riesgos asociados a los accidentes van más allá del nivel de planta y se plantea como una cuestión de seguridad nacional, por tanto, la energía nuclear en todo el mundo se enfrenta al riesgo sistémico de los accidentes nucleares (Cherp et al. 2012). También, como la mayoría de la tecnología de generación de electricidad de capital intensivo, es económicamente difícil para la energía nuclear competir en los mercados liberalizados, donde el inversor tiene que asumir el riesgo financiero de la inversión.

Desde el punto de vista de la robustez debe de ser considerada la vulnerabilidad de las centrales térmicas debidas a la escasez o indisponibilidad de los caudales de refrigeración necesarios. Los escenarios de calentamiento del clima y de sequía podrían incrementar estos riesgos.

4.5 Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es una energía renovable, que depende básicamente de aspectos locales o nacionales, pero que puede entrañar riesgos para la soberanía, en tanto en cuanto los recursos hídricos se gestionen en el interior de cuencas en muchas ocasiones compartidas por diferentes países.

La producción mundial de electricidad de origen hidroeléctrico se incrementó entre 2002 y 2012 en un 38,9%, en los países de la OCDE creció en un 7,5% y en los No-OCDE lo hizo en un 69,0%. Los países más significativos son China con un incremento de su producción del 198,9% e India con un 68,7%, el incremento medio en Latinoamérica es del 33,5%.

La producción media mundial de electricidad de origen hidroeléctrico es del 16,3%, en los países de la OCDE es del 12,9% y en los No-OCDE es del 19,5%, como situación de interés destacar que en Latinoamérica la producción media es del 60,1%, lo que significa un nivel de dependencia a considerar, Noruega depende en un 96,7%, Brasil en un 75,4% o Canadá en un 62,3% (BP 2013).

Desde el punto de vista de la robustez del sistema los aspectos a considerar en la vulnerabilidad del sistema son la variabilidad estacional de la disponibilidad de recursos, y las condiciones climáticas y en particular las precipitaciones en la cuenca de captación. También hay que considerar que el agua tiende a ser cada vez un bien más escaso, no solo debido al cambio en las condiciones climáticas, sino sobre todo al cambio en la demanda, por lo que existe un nivel creciente de competencia sobre un recurso que es necesario para usos domésticos, industriales y agrícolas, en este contexto la producción de electricidad es un uso más y no necesariamente el prioritario.

Algunos procesos relacionados con el cambio climático pueden alterar de forma notable los patrones hidrológicos de una zona, la disminución de pluviometrías es el más obvio, pero el cambio en los patrones nivales y la desaparición de los glaciares permanentes, los cambios en la temperatura puede producir cambios en la evapotranspiración y en los regímenes de escorrentía, también el incremento de fenómenos climáticos extremos puede alterar el régimen de caudales hasta el punto de afectar las condiciones económicas de su explotación. Los cambios en los niveles de estrés hídrico pueden derivar en cambios de vegetación que alteren los niveles de erosión, que afecten a los procesos de sedimentación en las presas, y hasta la calidad del agua que es turbinada.

Desde la perspectiva de la soberanía los riesgos se pueden derivar de decisiones tomadas por otros países, ubicados aguas arriba en la misma cuenca hidrológica, la construcción de embalses, los planes de regadío, los procesos de industrialización, el crecimiento de la demanda asociado al crecimiento de la población, etc., pueden ser motivos por los que un país incrementa las captaciones de agua de un río compartido. Los cambios en los caudales disponibles de un río tendrán una influencia directa sobre la viabilidad económica y financiera de un proyecto hidroeléctrico, ya que las plantas hidroeléctricas tienen una vida de más de 50 años (Cherp et al. 2012).

Y desde la perspectiva de la resiliencia hay que considerar las dificultades que pueden suponer para un país hacer frente a una interrupción de suministro, por fallo técnico o por una perturbación provocada, cuando se depende excesivamente de esta fuente de energía, y más cuando la producción se concentra en un número reducido de presas, de difícil sustitución desde el punto de vista del abastecimiento.

4.6 Energías renovables

Las energías renovables analizadas en este apartado son las llamadas “nuevas” energías renovables (*New renewable energy sources* (NRES)), el concepto de nuevas energías se refiere a que su uso es el resultado de programas de aprovechamiento relativamente recientes, con tecnologías modernas, que en muchos casos están aún en fase de maduración o de costes decrecientes con el tiempo, dentro de esta categoría se incluyen la energía solar, el viento la geotérmica la biomasa y otras, ver Tabla 4.3. El crecimiento mundial de la producción eléctrica de las NRES entre 2002 y 2012 es de un 290%, se ha pasado de 269,3 TWh a 1.049,2 TWh.

Son muchos los países que tienen algún tipo de programa en nuevas energías renovables, de hecho 44 países con una población de 4.587 Mp tienen una aportación de estas fuentes de energía al consumo eléctrico superior al 1,0%, 23 países con 1.049 Mp tienen una aportación superior al 5%, y tan solo 8 países con 217 Mp tienen una aportación superior al 15%, estos son los países pioneros en la introducción de las nuevas tecnologías, por orden de aportación son Dinamarca, Portugal, España, Nueva Zelanda, Alemania, Irlanda, Finlandia e Italia. Aunque una priorización diferente se obtendría si se tomara el volumen de producción, en ese caso cuatro países concentran el 53,5% de la producción mundial, EEUU, China, Alemania y España. Lo que pone en evidencia que a pesar de los avances en la última década, puede considerarse que es el inicio de un proceso de transición energética al que la mayoría de los países no se han incorporado, o en el que los esfuerzos depositados son muy limitados.

Tabla 4.3: Producción de electricidad a partir de fuentes renovables, en relación al consumo de energía primaria y al consumo de electricidad. Elaboración propia, datos (BP 2013).

Regions/country	Hydroelectric	Solar	Wind	Geothermal, Biomass, Other	Primary consumption	Electricity consumption	Primary renewables		Electricity renewables	
	TWh	TWh	TWh	TWh	Mtoe	TWh	Mtoe	%	TWh	%
<i>Regions</i>										
Total S. & Cent. America	732,4	0,1	7,4	61,6	665,3	1218,4	181,3	27,3	801,4	65,8
Total Europe & Eurasia	843,3	71,3	208,4	158,3	2928,5	5345,8	289,9	9,9	1281,2	24,0
Total North America	690,8	5,1	155,1	91,7	2725,4	5157,7	213,3	7,8	942,7	18,3
Total Asia Pacific	1277,3	15,8	147,7	120,0	4992,2	9145,4	353,2	7,1	1560,8	17,1
Total Africa	106,7	0,3	2,5	3,4	403,3	694,9	25,5	6,3	112,8	16,2
Total Middle East	22,7	0,3	0,2	0,1	761,9	942,2	5,3	0,7	23,3	2,5
Total World	3673,1	93,0	521,3	435,0	12476,6	22504,3	1068,6	8,6	4722,4	21,0
OECD	1394,8	86,2	373,3	288,2	5488,8	10804,4	484,8	8,8	2142,6	19,8
Non-OECD	2278,3	6,8	147,9	146,8	6987,8	11700,0	583,7	8,4	2579,8	22,0
European Union	327,2	70,7	200,4	148,9	1673,4	3260,5	169,1	10,1	747,1	22,9
<i>Countries</i>										
Denmark	0,0	0,1	10,4	4,4	17,0	30,4	3,4	19,9	14,9	49,0
Portugal	6,7	0,4	10,0	3,5	22,7	47,3	4,6	20,5	13,8	29,3
Spain	20,5	11,9	49,1	5,0	144,8	297,1	19,6	13,5	66,0	22,2
New Zealand	22,8	0,0	2,0	6,7	19,6	44,1	7,1	36,4	8,8	19,9
Germany	21,2	28,0	46,0	40,9	311,7	617,6	30,8	9,9	114,9	18,6
Republic of Ireland	1,0	0,0	4,2	0,3	13,0	27,0	1,3	9,7	4,5	16,8
Finland	16,7	0,0	0,5	11,1	26,4	70,3	6,4	24,3	11,6	16,6
Italy	41,5	18,5	13,2	16,4	162,5	295,7	20,3	12,5	48,2	16,3
Belgium	0,4	1,7	2,7	7,0	60,6	78,4	2,7	4,4	11,4	14,5
Philippines	10,8	0,0	0,1	10,3	30,2	72,3	4,8	15,9	10,4	14,3
Lithuania	0,3	0,0	0,5	0,2	6,0	5,0	0,2	3,7	0,7	14,1
Netherlands	0,1	0,2	4,9	7,0	89,1	101,6	2,8	3,1	12,2	12,0
Sweden	78,8	0,0	7,2	11,6	52,9	174,2	22,1	41,7	18,7	10,8
United Kingdom	5,2	1,3	20,7	15,2	203,6	363,2	9,6	4,7	37,2	10,3
Austria	39,4	0,4	2,3	4,6	33,1	72,0	10,5	31,9	7,2	10,1
Brazil	417,6	0,0	4,9	44,7	274,7	553,7	105,7	38,5	49,7	9,0
Greece	4,4	0,8	4,0	0,2	28,8	56,2	2,1	7,4	5,0	8,9
Poland	2,0	0,0	4,7	9,2	97,6	162,0	3,6	3,7	13,9	8,6

Hungary	0,2	0,0	0,8	1,9	21,9	34,3	0,6	2,9	2,6	7,6
Czech Republic	3,0	2,2	0,4	3,2	41,9	87,6	2,0	4,8	5,8	6,6
Chile	20,4	0,0	0,4	3,6	35,5	68,8	5,5	15,5	4,0	5,8
US	279,3	4,4	141,5	78,3	2208,8	4256,1	113,9	5,2	224,2	5,3
Australia	18,0	2,8	6,9	2,5	125,7	236,4	6,8	5,4	12,3	5,2
Indonesia	12,8	0,0	0,0	9,8	159,4	200,3	5,1	3,2	9,8	4,9
Romania	12,2	0,0	2,6	0,1	33,6	59,9	3,4	10,1	2,8	4,6
India	115,7	0,3	31,2	16,5	563,5	1053,9	37,0	6,6	48,0	4,6
Slovakia	4,4	0,6	0,0	0,7	16,9	28,4	1,3	7,6	1,3	4,5
France	58,3	4,0	14,2	5,7	245,4	560,5	18,6	7,6	23,9	4,3
Japan	80,9	6,2	4,5	25,3	478,2	1101,5	26,5	5,5	36,1	3,3
Canada	380,2	0,7	11,7	6,8	328,8	610,2	90,4	27,5	19,1	3,1
Thailand	8,7	0,5	0,0	4,7	117,6	166,4	3,1	2,7	5,2	3,1
Bulgaria	3,2	0,4	1,0	0,1	17,9	47,4	1,1	5,9	1,5	3,1
Turkey	57,9	0,0	5,7	1,4	119,2	239,1	14,7	12,3	7,2	3,0
Mexico	31,2	0,1	1,9	6,7	187,7	291,4	9,0	4,8	8,7	3,0
China	860,8	4,5	100,4	36,1	2735,2	4937,8	226,7	8,3	141,0	2,9

Las principales preocupaciones sobre la robustez de las NRES son los costos, la intermitencia y la disponibilidad suficiente en los lugares en que se consumen. Aunque son menos vulnerables a las fluctuaciones de los precios, de hecho la materia prima no tiene costes asignados, los costes de inversión son considerables, y por tanto los riesgos financieros de la inversión y los posibles cambios en el marco legal pueden hacer irrentables explotaciones que sí lo fueron en su puesta en marcha. La intermitencia de NRES (con excepción de la biomasa y geotérmica) es otra preocupación que está conectada con las variaciones diarias, estacionales o de otro tipo de los factores naturales (sol, viento, mareas) (Cherp et al. 2012). La integración en redes que permitan la redistribución de la energía y el desarrollo de soluciones tecnológicas de almacenamiento de calor, bombeo de agua, almacenamiento de hidrógeno u otras posibles soluciones, son las respuestas que permitirán limitar estos riesgos.

Los problemas relacionados con la soberanía de estas tecnologías son muy limitados, ya que se trata de tecnologías que operan con recursos locales. La excepción son los biocombustibles líquidos, que cada vez más son adquiridos en un mercado global. Y en la medida que las tecnologías evolucionan protegidas por derechos de patente, puede ser más difícil para los países su adaptación a las realidades locales, derivando de hecho en situaciones de dependencia de tecnologías importadas que pueden afectar a la seguridad energética.

Las NRES permiten mejorar la resiliencia de los sistemas ya que presentan una mayor diversidad tecnológica, unidades más pequeñas y una mayor distribución por el territorio, lo que supone una mejor protección contra las perturbaciones técnicas, humanas o naturales, y una mayor capacidad de recuperación que las fuentes de energía convencionales.

5 LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO

La *International Strategy for Disaster Reduction* define el riesgo como “la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas” (UNISDR 2009), similar a la definición de la Guía 73 de la ISO/IEC. “Evento” se refiere a la perturbación a que puede ser sometido un sistema, y las consecuencias que se derivan dependerán de la vulnerabilidad de este, que se definen como “las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza”, y dependen de factores físicos, sociales, económicos y ambientales. La vulnerabilidad varía dentro de una comunidad y en el transcurso del tiempo.

Esta definición se utiliza para establecer que el riesgo puede obtenerse como la combinación de la probabilidad de un evento (*hazard*) y sus consecuencias negativas, entendidas como variables de vulnerabilidad (De Groeve, Poljanšek, and Vernaccini 2014).

$$Risk = Hazard \cdot Vulnerability \quad (1)$$

La vulnerabilidad física depende del peligro y de la exposición (*Hazard & Exposure*), cuanto mayor sea la exposición física mayor es el riesgo, por otra parte cuanto mayor es la fragilidad del sistema socio-económico mayor es el riesgo (*vulnerability*), y los recursos institucionales y de infraestructura aumentarán la capacidad de respuestas, o al contrario una baja capacidad de gestión de desastres significa una menor capacidad de reacción (*lack of coping capacity*), y por tanto un mayor riesgo.

$$Risk = Hazard \& Exposure \cdot Vulnerability \cdot Lack\ of\ coping\ capacity \quad (2)$$

La evaluación del riesgo que supone una perturbación para un sistema, requiere de indicadores e índices que aporten una visión cuantitativa, para ser analíticamente útiles los riesgos no solo han de ser descritos, sino que también han de ser cuantificados, solo así podrán ser evaluadas las consecuencias sobre la seguridad energética de diferentes políticas o vías de desarrollo. Una norma sobre seguridad de abastecimiento energético requiere de criterios e instrumentos de medición del riesgo (Scheepers et al. 2007).

No obstante debe de observarse que la seguridad energética contiene un gran número de dimensiones, y los indicadores e índices utilizados para su medición solo se refieren a una o varias de ellas, pero siempre de forma limitada y parcial, por tanto los resultados obtenidos no deben de ser entendidos de forma absoluta, sino como una herramienta que pueda detectar deficiencias de forma parcial o ayudar a estudiar las implicaciones de una determinada acción, política o norma.

Es esta una de las principales funciones de los indicadores, apoyar la formulación de políticas integradas y efectivas, pero para ello es preciso que:

- a) Los indicadores sean el resultado del análisis sistemático de los factores de riesgo y resiliencia.
- b) Los indicadores deben permitir el seguimiento de la seguridad energética a través del tiempo, así como la comparación entre los países y las opciones de política.
- c) Los índices agregados pueden ayudar a comparar y priorizar las diversas preocupaciones sobre la seguridad energética y la búsqueda de soluciones de compromiso político.

5.1 Indicadores

5.1.1 Indicadores simples

Medida de la diversidad (Kruyt et al. 2009). Dentro de los indicadores simples, la medida de la diversidad en cuanto al tipo de combustibles y en cuanto al origen geográfico, se piensa que es un medio importante de protección contra los riesgos de suministro y contra los choques de precios, esta diversidad se mide con el *índice de Shannon (Shannon-Wiener diversity index, SWDI)* o con el *índice de Herfindahl-Hirschman (HHI)*. El primero de ellos, el índice de Shannon, se expresa como.

$$H = - \sum p_i \ln p_i \quad (3)$$

Donde p_i representa la proporción del combustible i en el mix energético o la cuota de mercado del proveedor i . Cuanto mayor sea el valor de H , más diverso es el sistema. El índice de Herfindahl-Hirschman se expresa como.

$$D = \sum p_i^2 \quad (4)$$

Cuanto menor sea el valor de D , más diverso es el sistema.

Medida de la dependencia energética. En este sentido un indicador de referencia es el valor de las importaciones en relación al total del consumo primario de un tipo de energía. Un indicador más elaborado es una medida combinada de la diversidad y la dependencia de las importaciones (APEREC 2007), a partir de una adaptación del índice de Shannon para medir dependencia, se obtiene el *Net Energy Import Dependency* (NEID).

$$NEID = \frac{\sum m_i p_i \ln p_i}{\sum p_i \ln p_i} \quad (5)$$

Donde m_i es la participación en las importaciones netas del proveedor i , y p_i su participación en el suministro total de energía primaria. En este caso, un valor más alto implica una seguridad de abastecimiento energético menor.

La IEA propone una modificación del indicador de dependencia introduciendo un factor que incorpore la estabilidad política, es el *Energy Security Market Concentration and political risk* (ESMCpol).

$$ESMCpol = \sum (r_i S_i^2) \quad (6)$$

Donde r_i es la calificación de riesgo político del país i , y S_i es la participación como proveedor en el mix energético.

Indicador de Mean variance portfolio (MVP). La teoría de la variación media de la cartera se deriva de la economía financiera, trata de maximizar el retorno y minimizar el riesgo mediante la cuidadosa elección de los componentes. Propone que el inversor debe abordar la cartera como un todo, estudiando las características de riesgo y retorno global, en lugar de escoger valores individuales en virtud del retorno esperado de cada valor en particular (IEA 2007).

Indicador de combustibles con cero emisiones de carbono. Es un indicador que refleja los esfuerzos de una economía por avanzar hacia una energía sin carbono. Se mide la cuota de las energías renovables y la energía nuclear en el suministro total de energía primaria. En ocasiones este indicador se utiliza para medir el grado de independencia o seguridad energética, si bien esto es cierto para las energías renovables en general, sería más discutible que sea cierto en el caso de la energía nuclear, o para los biocombustibles obtenidos de productos importados.

Medida de la estabilidad política. La situación política en los países proveedores es fundamental para la seguridad de suministro. Uno de los indicadores de riesgo de referencia es el *International Country Risk Guide* (ICRG) (PRSG 2014), que se basa en la valoración de 22 variables en tres categorías de riesgo: político, financiero y económico. La calificación de riesgo político incluye 12 variables ponderadas que abarca tanto los atributos sociales y políticos, entre las que se encuentran la estabilidad del gobierno, la situación económica, los conflictos internos y externos, la corrupción, la militarización de la política, las tensiones religiosas y étnicas, etc.. Este indicador se parece más a un indicador agregado que a un indicador simple.

Reservas por producción (R/P). Reservas de energía que quedan al final de un año en relación a la producción de ese año. El resultado depende de la definición de reservas utilizada, si son reservas probadas, probables o posibles, inferidas a partir información geológica y de ingeniería con una determinada certeza. Es un indicador con importantes limitaciones en la modelización de escenarios de futuro, la tasa de utilización de las reservas de energía depende de muchos factores, incluyendo las condiciones económicas, la geología del yacimiento, los precios, el progreso tecnológico y las actividades de exploración. Este indicador representa por tanto una medida relativa de la disponibilidad de reservas (IAEA 2005).

5.1.2 Indicadores agregados

El *Energy research Centre of the Netherlands* y el *Clingendael International Energy Programme* proponen dos índices para Europa, el *Crisis Capability Index and the Supply/Demand Index* (Scheepers et al. 2007), el primero se refiere al riesgo de interrupción súbita o colapso de la oferta a corto plazo, y la capacidad para manejar la situación, y el segundo es sobre la relación entre oferta y demanda total, presente y futura.

Índice de Crisis de Capacidad. Combina la evaluación del riesgo de que un país sufra una interrupción repentina (RA, *Risk Assessment*) de suministro y las consecuencias que se derivan, con la evaluación de la capacidad del país para mitigar (MA, *Mitigation Assessment*) los impactos. Cada país hace su propia evaluación, a partir de una metodología establecida. Si la RA es mayor que el valor de MA, el índice de CC obtiene un valor de menos de 100.

La evaluación del riesgo de interrupción se hace considerando cinco categorías de estudio: La producción nacional primaria, las importaciones, la conversión, el transporte interior en la UE y las rutas de las importaciones. Estas categorías se subdividen en 16 ámbitos de estudio, en los que el riesgo se analiza en relación a tres tipos de factores: los factores técnicos y de organización, los factores humanos y políticos (incluidos los errores humanos y acciones deliberadas tales como atentados terroristas), y los factores naturales. No todos los elementos del sistema de energía son de igual importancia para la seguridad, por lo que se introducen factores de ponderación en las diferentes categorías.

Para evaluar la capacidad de mitigación y la adopción de medidas de emergencia, se tiene en cuenta la actuación del país en cinco ámbitos: las existencias estratégicas o de emergencia, la restricción de la demanda, la capacidad de sustitución de combustible, capacidad de reserva y la capacidad de producción garantizada. Con respecto a las reservas de emergencia de petróleo o reservas estratégicas, se toma como referencia la exigencia de la UE de mantenerlas en un valor equivalente a 90 días de consumo de petróleo. Con respecto a la restricción de la demanda y los dispositivos de racionamiento en situaciones de emergencia, se considera que se trata de un tema muy complejo en las sociedades modernas, las posibles medidas a considerar tienen que ver con la fijación de prioridades de abastecimiento y la programación de cortes de entrega obligatoria, tanto en el suministro de electricidad como en el de combustibles. En este sentido una alternativa interesante sería el uso de contratos interrumpibles, donde el proveedor y el consumidor podrían usar la opción de interrumpir o restringir las entregas, con el fin de conseguir una asignación equitativa de los suministros disponibles.

La capacidad de sustitución de la demanda es también una alternativa a las restricciones de abastecimiento, aunque ello puede suponer elevadas dificultades técnicas, si eso no está previsto como consideración en la adquisición de los equipos. La capacidad de producción de reserva se puede encontrar en la capacidad fuera de servicio, pero operativa, en las capacidades excedentes en los sistemas de interconexión y suministro, y en los acuerdos de importación. La capacidad de producción garantizada se refiere a la capacidad para incrementar la producción a corto plazo de forma garantizada, dados los márgenes para el incremento de la explotación de un recurso.

Índice oferta/demanda. Este índice tiene como objetivo la evaluación de la seguridad del abastecimiento energético a medio y largo plazo, en el ámbito de la demanda final de energía, la conversión, el transporte, y el abastecimiento primario. Toma en consideración los sectores y tipos de demanda final, y los sistemas de conversión y transporte (eficiencia, capacidad y fiabilidad).

El índice S/D utiliza cuatro tipos de información: las acciones en el ámbito de la oferta y la demanda, los valores que caracterizan la capacidad y la fiabilidad, el peso relativo de los diferentes ámbitos de estudio y las reglas de puntuación de cada aspecto individual. Y utiliza, a su vez, cuatro factores de intensidad energética para evaluar la evolución de la estructura de la demanda: la intensidad energética del sector residencial (toe/h), la intensidad energética sobre el valor añadido del sector industrial (toe/M€), la intensidad energética sobre el valor añadido para el sector terciario (toe/M€), y la intensidad energética del sector del transporte (toe/Mt-km, toe/Mv-km).

Para evaluar la seguridad del suministro de energía primaria, el índice considera la producción nacional de energía primaria en comparación con las importaciones procedentes de otros Estados miembros. Las importaciones procedentes de la UE frente a las importaciones fuera de la UE. Y las importaciones procedentes de fuera de la UE amparadas por contratos a largo plazo frente a los contratos a corto plazo.

Disposición a pagar. Se trata de un indicador propuesto por J. Bollen (Bollen 2008), está diseñado para representar el porcentaje del PIB que un país está dispuesto a sacrificar para reducir los riesgos de seguridad de abastecimiento.

$$IMP_{t,r} = A i_{t,r}^{\alpha} C_{t,r}^{\beta} E_{t,r}^{\gamma} \quad (7)$$

Donde *IMP* es la disposición a pagar para evitar la falta de seguridad en% del PIB, *i* es el coeficiente de importación del combustible; *C* es la proporción del combustible; *E* es la intensidad energética; *A* es una región, en $t = 0$, α , β , γ son los exponentes con un valor de 1.1, 1.2, 1.3, respectivamente.

Oil vulnerability index(OVI) (Gupta 2008). Se trata de un índice agregado de la vulnerabilidad del petróleo sobre la base de siete indicadores: la relación entre el valor de las importaciones de petróleo y el PIB, el consumo de petróleo por unidad de PIB, PIB per cápita, la participación del petróleo en el suministro total de energía, el índice de las reservas nacionales para el consumo de petróleo, la exposición a los riesgos de concentración de abastecimiento de petróleo geopolítico, medido por la dependencia de las importaciones netas de petróleo, la diversificación de las fuentes de suministro, el riesgo político en los países proveedores de petróleo, y la liquidez del mercado.

5.1.3 Otras propuestas de indicadores

En (Martchamadol and Kumar 2013) se realiza una exhaustiva recopilación de indicadores simples y compuestos, referidos a la sostenibilidad energética y a la seguridad energética, y contenidos en un conjunto muy extenso de publicaciones científicas y de informes de diversas instituciones. De ese conjunto de publicaciones se seleccionan las más significativas, y con ellas se confecciona la Tabla 5.1, en la que se relacionan los indicadores e índices contenidos en estos informes con las diferentes dimensiones de la sostenibilidad y la seguridad (variables), tomadas en consideración. Los informes de referencia son los siguientes:

- a) *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies* (IAEA 2005). Energy for Sustainable Development.
- b) *A Quest for Energy Security in the 21st Century* (APERC 2007). Energy Security Assessment.
- c) *Energy Security in Developing Countries* (Shrestha and Kumar 2010). Energy Security Assessment.
- d) *An analysis of major countries energy security policies and conditions: quantitative assessment of energy security* (Murakami, Motokura, and Kutani 2011). Energy Security Assessment.
- e) *Assessing the sustainability challenges for electricity industries in ASEAN newly industrializing countries* (Vithayasrichareon, MacGill, and Nakawiro 2012).
- f) *Designing indicators of long-term energy supply security* (Jansen, Arkel, and Boots 2004).
- g) *Energy security and climate change policy interactions an assessment framework* (Blyth and Lefèvre 2004).
- h) *EU standards for energy security of supply updates on the crisis capability index and the supply/demand index quantification for EU-27* (Scheepers et al. 2007)
- i) *Energy security, air pollution, and climate change: an integrated cost benefit approach* (Bollen 2008).
- j) *Oil vulnerability index of oil-importing countries* (Gupta 2008).
- k) *World Energy and Climate Policy: 2009 Assessment* (WEC 2009).
- l) *Pursuing sustainability: 2010 Assessment of country energy and climate policy* (WEC 2010b).
- m) *Assessing energy sustainability of rural communities using principal component analysis* (Doukas et al. 2012).

Esta Tabla 5.1 contiene una propuesta de 94 variables para las cuatro dimensiones consideradas: institucional, social, ambiental y económica. En cada columna se han marcado las variables utilizadas en cada uno de los estudios de referencia, ya sean contenidas en índices o de forma desagregada. La tabla pone de manifiesto la disparidad en los criterios de medición de la seguridad energética entre los diferentes analistas. Esta lista no es completa y podría continuar incrementándose, por ejemplo la seguridad de las redes, sistemas e instalaciones está muy escasamente tratada.

Tabla 5.1: Indicadores de referencia para las dimensiones: institucional, social, ambiental y económica, en relación a los estudios de referencia, y *Aggregated Energy Security Performance Indicator* (AESPI). Fuente (Martchamadol and Kumar 2013).

[illegible]

S2	Salud y seguridad					x										
S3	Densidad de población															
S4	Tasa de Electrificación/El acceso de los hogares de electricidad			x		x	x									x
S5	Gasto de energía de los hogares			x			x									x
S6	Relación entre los residentes locales y el máximo de turistas de temporada (%)															
S7	Energética residencial por hogar			x			x									x
Indicadores de la dimensión ambiental																
EN1	Calidad del aire															
EN2	CO2 per cápita					x										x
EN3	CO2 por PIB					x										x
EN4	CO2 por kW h					x										
EN5	Bosque/biodiversidad															
EN6	Calidad del suelo															
EN7	Residuos sólidos															
EN8	Calidad del agua															
Indicadores de la dimensión económica																
CE 1	Disponibilidad de crédito al sector privado												x			
CE 2	Gasto medio en electricidad	x				x										x
CE 3	Margen de capacidad (electricidad)	x				x						x				
CE 4	Costo de los gastos que vivienda												x			
CE 5	Suministro transfronterizo y las interconexiones (lista de comprobación)					x										
CE 6	Grado de conservación de la demanda				x											
CE 7	Grado de la gestión del riesgo interno				x											
CE 8	Grado de la gestión del riesgo de interrupción de suministro				x											
CE 9	Grado de la gestión de riesgos de transporte				x											
CE 10	La dependencia de los puntos de estrangulamiento				x											
CE 11	Diversity of primary energy demand (DoPED)		x													
CE 12	Diversity of supply of fuel types and suppliers (import) (SWI)				x											
CE 13	Diversity of supply of fuel types and suppliers (SWI)	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
CE 14	Intensidad Electricidad					x										
CE 15	Electricidad por habitante	x				x										x
CE 16	Precio de la electricidad	x				x										
CE 17	Subsidio Tarifa Eléctrica	x				x										
CE 18	Uso final y producción en cada sector	x														
CE 19	Crecimiento del consumo de energía												x			
CE 20	Importación de energía	x					x	x	x	x	x	x				
EC21	La intensidad energética (TPES/GDP) y/o por sector	x							x	x	x	x	x			x
EC22	Inversión Energía / inversión total											x				
EC23	Energía / petróleo per cápita	x												x		x
EC24	Precio de la energía / precio del petróleo	x												x		
EC25	Energía I + D / PIB												x			
EC26	Gasto en la importación de energía por PIB			x												
EC27	Gasto en la importación de energía por ingresos totales de exportación			x												
EC28	Consumo de combustibles fósiles por habitante														x	
EC29	Mezcla de combustible en la generación de electricidad (%)					x								x		
EC30	Tasa de crecimiento del PIB												x			
EC31	PIB per cápita										x	x			x	
EC32	Energía doméstica / electricidad per cápita	x														x
EC33	Cuota de la Industria en el PIB												x			
EC34	Tasa de inflación													x		
EC35	Índice de Innovación													x		
EC36	Tasa de interés a largo plazo													x		
EC37	Estabilidad Macroeconómica														x	
EC38	Concentración del mercado															
EC39	Liquidez del mercado							x					x			
EC40	Middle East Oil Import Dependency (MEOID)		x													
CE 41	Net Energy Import Dependency (NEID)	x	x	x												x
CE 42	Net Oil Import Dependency (NOID)		x													

CE 43	Non-Carbon Fuel portfolio (NCFP)	x	x															x
CE 44	Número de días de las reservas de petróleo en tierra																	
CE 45	Precios de los derivados del petróleo	x									x	x	x					
CE 46	Petróleo / gastos en energía																	
CE 47	Tasa de autosuficiencia en Energía Primaria				x													
CE 48	Calidad de la infraestructura											x						
CE 49	Relación entre la producción de energía y el consumo													x				
CE 50	Ratio of RE per fossil fuel for electricity generation																x	
CE 51	Fiabilidad de la infraestructura de redes eléctricas	x										x						
CE 52	Fiabilidad de la infraestructura de redes de gas											x						
CE 53	Fiabilidad de las normas de funcionamiento				x													
CE 54	Dependencia de los combustibles importados para la generación de electricidad (%)				x													
EC 55	Política de energía renovable				x													
CE 56	Producción de energía renovable por habitante																x	
CE 57	Reserva a ratios de producción (RPR)	x		x			x	x			x							x
CE 58	Estimación de Recursos	x																
CE 59	SAIFI y SAIDI				x													
CE 60	Participación del petróleo en el sector del transporte																	
CE 62	Parte de la energía renovable para la producción térmica																x	
CE 63	Parte de la energía renovable por la demanda de energía final	x																x
CE 64	Stock de fuentes de energía	x										x	x					
CE 65	Estrategia para la energía nuclear (lista de comprobación)				x													
CE 66	Eficiencia técnica / pérdidas en el sistema de Transformación de la energía	x										x	x					x
CE 67	Total gasto I + D / PIB											x						
CE 68	Margen mayorista de la gasolina												x					

Son bastantes los estudios que tratan de aproximarse a una mejor definición de la seguridad energética elaborando listas más o menos extensas de preocupaciones, agrupadas por dimensiones. En estos estudios normalmente se presta poca atención a la metodología utilizada para la elección de unos indicadores y no otros, por lo que responden a un procedimiento poco transparente y riguroso (Cherp and Jewell 2011). La complejidad del término y la diversidad de realidades en las que pretende ser definido no pueden ser abarcadas por agregación de preocupaciones dispares que no necesariamente nos ayudarán a entenderlos mejor.

Por otra parte debe de tomarse en consideración que el exceso de cuantificación puede también resultar en detrimento de las preocupaciones no cuantificables, las incertidumbres o la falta de linealidad, y en procesos de ponderación y agregación pueden resultar poco objetivos, poco transparentes y poco interpretables.

Cherp y Jewell concluyen por tanto que en la actualidad “la complejidad de los problemas de seguridad energética es tal que ya no pueden ser tratados en forma aislada unos de otros. Esto define el reto fundamental de los estudios de seguridad de energía modernos: el logro de la integración académica y la política de las perspectivas previamente aisladas. El objetivo de esta integración está lejos de ser trivial, ya que cada punto de vista se basa en su propio idioma distinto, los métodos, los discursos y los marcos conceptuales, por no hablar de las comunidades asociadas de la práctica”. “Esta integración debe respetar e incorporar el conocimiento de cada una de las disciplinas que la constituyen, y centrarse en aquellas áreas y perspectivas que pueden ayudar a resolver los desafíos que enfrentan los otros”. Construir un campo interdisciplinario de los estudios de seguridad energética debería de empezar por:

- Establecer los límites del campo de estudio,
- Establecer las preguntas centrales de investigación, y
- Identificación de un conjunto de métodos fiables y marcos teóricos.

Y concluyen que un punto importante a considerar es que este tipo de análisis debe centrarse en gran medida en los contextos nacionales específicos, más que en consideraciones abstractas y genéricas. Para abarcar la complejidad deben de estudiarse profundamente las interacciones a nivel nacional entre la física, la política y la economía. Es posible que los principios universales de tales interacciones puedan ser deducidos, para dar forma a la larga a las teorías más generales de la seguridad energética.

5.2 Modelos de análisis de la seguridad energética a corto plazo

Tal y como se ha indicado, son muchos los estudios que intentan definir y evaluar la seguridad energética, algunos de ellos han sido estudiados y referenciados en este proyecto de tesis, pero, con el fin de concretar los objetivos a desarrollar y poder formular las preguntas que han de ser respondidas, se hace necesario profundizar en la descripción de algunos de estos trabajos, analizando los modelos de evaluación de la seguridad energética que se proponen, las ideas que los inspiran, los indicadores e índices que los definen, las metodologías utilizadas y las limitaciones que presentan.

La seguridad energética ha entrado en un proceso de revisión coincidiendo con el cambio de siglo, hay importantísima actividad académica en ese sentido y el volumen de publicaciones científicas es notable, es por ello que para la elección de estos modelos de referencia se han utilizado tres criterios: el primero es que tengan una cierta actualidad, de tal manera que puedan haber integrado los debates y las ideas inspiradas en la década pasada, en segundo lugar que consideren las diferentes dimensiones de la sostenibilidad, concretamente las tres dimensiones de la seguridad energética (soberanía, robustez y resiliencia), y en tercer lugar que se trate de estudios que más allá de listados de variables o indicadores, hayan desarrollado una metodología de análisis y hayan sido puestos en práctica en el estudio de casos.

Uno de estos modelos de referencia es *Model of Short-term Energy Security* (MOSES), es un modelo de evaluación de la seguridad energética en el corto plazo, desarrollado en el marco del *Directorate of Energy Markets and Security* de la *International Energy Agency*, la descripción del modelo está desarrollada en diferentes publicaciones de la IEA (IEA 2011; Jewell 2011). La seguridad energética a corto plazo se entiende como “la vulnerabilidad de los sistemas ante trastornos físicos que pueden durar días o semanas”, esta definición y el marco conceptual del modelo parte de algunos estudios previos como (Cherp and Jewell 2010; Kruyt et al. 2009; Sovacool and Brown 2010).

El modelo pretende ser útil en el ámbito de la política energética y particularmente en el de la seguridad energética a escala nacional, es este por tanto su principal ámbito de aplicación. Es una herramienta útil para establecer las prioridades de la política energética, identificando las mejores estrategias y evaluando los efectos de las diferentes políticas. Los indicadores utilizados tratan de medir los riesgos de interrupción en el suministro de energía, la capacidad de recuperación del sistema y la capacidad para hacer frente a las perturbaciones.

5.2.1 Marco conceptual

Al tratarse de un modelo de corto plazo, se excluyen aspectos que requieren del tiempo para ser analizados y que no podrían ser obviados en estudios a medio o largo plazo, es el caso de las implicaciones ambientales, la evolución de la demanda, el agotamiento de las reservas y los precios o la volatilidad de estos. Otros aspectos son recogidos de forma indirecta, como las políticas y las normativas desarrolladas, y en general el clima institucional y de inversión son importantes.

MOSES no produce índices agregados de seguridad y se limita al establecimiento de los niveles de seguridad respecto a fuentes particulares, por lo que no puede ser utilizado para comparar la seguridad global de países.

Sistemas fundamentales en la cadena de abastecimiento

La evaluación de la seguridad se hace a partir del estudio de todas las partes del sistema de energía o de los sistemas fundamentales en la cadena de abastecimiento, formada por los sistemas de producción, los sistemas de transformación, transporte y distribución, y los servicios de energía de uso final.

La primera versión de MOSES abarca siete fuentes primarias (petróleo crudo, gas natural, biomasa y residuos, energía hidroeléctrica, energía geotérmica y la energía nuclear) y dos conjuntos de combustibles secundarios (productos secundarios del petróleo y biocombustibles líquidos). MOSES también incluirá a los sistemas de generación eléctrica, las redes de distribución y los sistemas de consumo, agrupados por sectores en transporte, industria y un bloque que agrupa al sector residencial, al sector terciario y al primario. En estos momentos se trabaja en el desarrollo de los indicadores y las metodologías para estos ámbitos.

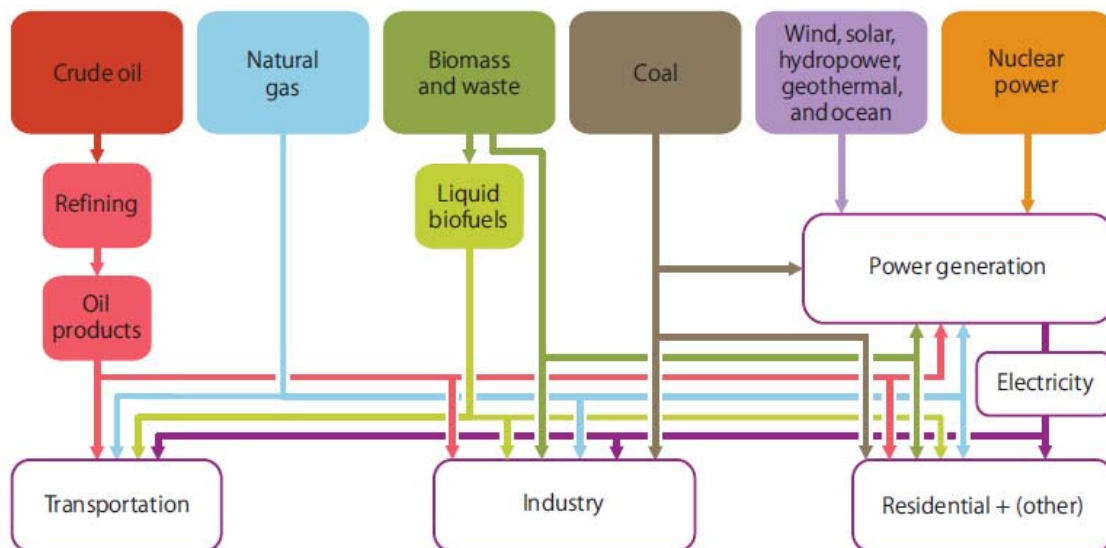


Figura 5.1: Sistemas de energía tratados en MOSES. Fuente (Jewell 2011)

Dimensiones de la seguridad energética consideradas

MOSES aborda cuatro dimensiones de la seguridad energética, clasifica la seguridad en factores externos e internos, y a su vez los divide en riesgos y resiliencia. Los factores externos son los relacionados con la importación de energía y los internos los relacionados con la producción, transformación y distribución de energía dentro de las fronteras nacionales, estos factores se dividen a su vez en riesgos, que son las amenazas que se ejercen sobre el sistema, y en resiliencia, que se refiere a las capacidades de los sistemas de energía para adaptarse o resistir interrupciones derivadas de las amenazas.

Tabla 5.2: Dimensiones de la seguridad energética evaluados por MOSES. Fuente (Jewell 2011)

	Riesgo	Resiliencia
Externo	<i>Riesgos externos:</i> riesgos asociados a posibles interrupciones de las importaciones de energía.	<i>Resiliencia externa:</i> capacidad de responder a las interrupciones de las importaciones de energía mediante la sustitución con otros proveedores y otras rutas de suministro.
Interno	<i>Riesgos domésticos:</i> riesgos que surjan en relación con la producción y transformación de la energía.	<i>Resiliencia interna:</i> capacidad nacional para responder a las interrupciones en el suministro de energía, tales como las reservas de combustibles.

5.2.2 Indicadores de MOSES

Para el análisis de las cuatro dimensiones anteriores MOSES utiliza 35 indicadores, algunos de estos indicadores son comunes a las diferentes fuentes analizadas, y otros tienen carácter específico. La identificación de los indicadores se ha hecho a partir del análisis de la literatura académica y profesional existente y mediante consultas de expertos dentro de la IEA, la aceptación de estos tiene como condición la existencia de información, que en la mayoría de los casos se encuentra disponible en series de tiempo con actualizaciones periódicas. Las fuentes de datos utilizadas incluyen la IEA, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), la Agencia de Energía Nuclear (AEN), el Banco Mundial (BM), la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) y las Infraestructuras Europeas de Gas (GIE).

Tabla 5.3: Valores y dimensiones de los indicadores de seguridad energética usados por MOSES. Fuente (Jewell 2011)

Indicador	COD	Muy bajo (MB)	Bajo (B)	Medio (M)	Alto (A)	Muy alto (MA)	Fuente	Dimensión		Energía	
Dependencia de importaciones	DI		≤ 15%	40%-65%	≥ 80%		IEA	Riesgo	Externo	Petróleo	
Estabilidad política de proveedores	EP		< 2,5	≥ 2,9			IEA				
Puntos de entrada (puertos y oleoductos)	PE	0 1	1 2	2 3-4	3-4 5-8	≥5 ≥9	IEA IEA	Resiliencia			
Diversidad de proveedores	DP		>0,8	0,3-0,8	<0,3		IEA				
Proporción de la producción en el mar	PM		<15%	>90%			IEA	Riesgo	Interno		
Volatilidad de la producción nacional	VP		<20%	>20%			IEA				
Nivel medio de almacenamiento	NA		≤15	20-50	≥55		IEA	Resiliencia			
Importaciones productos del petróleo	IPP	<5%	5%-25%	25%-45%	≥45%		IEA	Riesgo	Externo	Productos del petróleo	
Diversidad de proveedores	DP		≥0,54	0,18-0,54	≤0,18		IEA	Resiliencia			
Puntos de entrada	PE	Puertos	0	2-4	≥5						
		Ríos	1-2								
		Oleoductos	1-2			IEA					
Número de refinерías	NR		1				IEA	Riesgo			
Flexibilidad de las infraestructuras	FI		<6	6-9	≥9		IEA	Resiliencia	Interno		
Nivel medio de almacenamiento	NA	≤3	3-6	6-9	≥9		IEA				
Dependencia de importaciones	DI		≤10%	30%-40%	≥ 70%		IEA	Riesgo	Externo	Gas natural	
Estabilidad política de proveedores	EP		<1	1-4	≥4		IEA				
Puntos de entrada	PE	Puertos Gasoductos	0 1-2	1-2 3-4	≥3 ≥5		IEA	Resiliencia			
Diversidad de proveedores	DP		>0,6	0,3-0,6	≤0,3		IEA				
Proporción de la producción en el mar	PPM		≤30%	≥ 80%			IEA	Riesgo	Interno		
Capacidad transporte y almacenamiento	CTA		<50%	50%-100%	>100%		IEA	Resiliencia			
Intensidad de gas natural	IGN		<20	20-60	>60		IEA, WB				
Dependencia de importaciones	DI		0%	30%-70%	>70%		IEA	Riesgo	Externo		Carbón
Estabilidad política de proveedores	EP						IEA				
Puntos de entrada	PE	Puertos Trenes	1-2 2-3	3-4	>5		IEA	Resiliencia			
Diversidad de proveedores	DP		>0,6	0,3-0,6	<0,3		IEA				
Proporción de la minería subterránea	PMS		<40%	40%-60%			Various	Riesgo		Interno	
Dependencia de importaciones	DI	<15%	15%-25%				IEA	Riesgo			
Diversidad de proveedores	DP		>0,5	0,3-0,5	<0,3		IEA	Resiliencia	Interno	Biomasa y residuos	

Dependencia de importaciones	DI		<20%	40%-70%	>80%		IEA	Riesgo	Externo	Biocombustibles
Puntos de entrada (puertos)	PE	P. mar	0	2-3	≥5					
		P. río	1-2				IEA	Resiliencia	Interno	Hidroeléctrica
Volatilidad de la producción agrícola	VPA		0%-5%	5%-10%	>10%		IEA	Riesgo		
Volatilidad anual de la producción	VP						IEA	Ries/Resi	Interno	Nuclear
Tasa de interrupción no planificada	TI		<3%	3%-6%	6%-9%	>15%	IAEA	Riesgo		
Edad media de las centrales nucleares	EM		<20	20-30	>30		IAEA	Resiliencia	Interno	Nuclear
Diversidad de modelos de reactores	DM		>0,6	0,3-0,6	<0,3		IAEA			
Número de plantas de energía nuclear	NP		1	4-10	≥15		IAEA			

A cada indicador se le asignan tres niveles de vulnerabilidad, baja, media y alta, y en algunos casos se utilizan los niveles muy alto y muy bajo. A cada uno de estos niveles se le asignan los límites que determinan su utilización (ver Tabla 5.3), esta asignación se hace a partir de la consulta de expertos de cada una de las tecnologías.

La combinación de indicadores y de niveles permite asignar un perfil de seguridad a cada país y agrupar a los países que tienen perfiles similares, caracterizados por tener relaciones riesgo/resiliencia similares en las diferentes fuentes. Se utilizan cinco niveles de perfiles designados por letras de la “A” a la “E”. La metodología de valoración es la siguiente.

Petróleo crudo

El nivel de seguridad de abastecimiento del petróleo se establece en base a cuatro indicadores principales: la dependencia de importaciones (DI), los puntos de entrada (PE), la diversidad de proveedores (DP) y el nivel medio de almacenamiento (NA).

Los indicadores pueden adoptar valores entre muy bajo (MB) y muy alto (MA), según la clasificación de la Tabla 5.3, las combinaciones posibles de la Tabla 5.4 permiten asignar el perfil del país para la fuente de energía estudiada.

Tabla 5.4: Perfil de seguridad energética del petróleo, en función del valor de los indicadores de referencia. Fuente elaboración propia a partir de (Jewell 2011)

Petróleo				
Nivel indicadores				Perfil SE
DI	PE	DP	NA	
B				A
M				B
A	MA	A	A	B
A	MA	A	M	C
A	A	A-M	A-M	C
A	M	A	A-M	C
A	M	A	B	D
A	M	B	A-M	D
A	B	A-B	A-M	D
A	B	A-B	B	E
A	MB	A-M	A-M	D
A	MB	A-M	B	E
A	MB	B	A	D
A	MB	B	M	E

La asignación de perfil se hace por orden, una dependencia de importaciones baja o media implica un perfil “A” o “B” respectivamente, para una dependencia alta de importaciones, con un nivel muy alto de puntos de entrada, una alta diversidad de proveedores y un alto nivel de almacenamiento, se obtiene un perfil “B”.

Para un nivel alto de dependencia, a medida que disminuyen los puntos de entrada, disminuye la diversidad de proveedores y disminuyen los stocks, el perfil de seguridad disminuye.

Gas natural

Para la determinación del perfil de seguridad de abastecimiento del gas natural se usan los mismos indicadores que para el petróleo.

Tabla 5.5: Perfil de seguridad energética del gas natural, en función del valor de los indicadores de referencia. Fuente: elaboración propia a partir de (Jewell 2011)

Gas Natural				
Nivel indicadores				Perfil SE
DI	PE	DP	NA	
B				A
M	A			A
A	A	A	A-M	B
A	A	A	B	C
A	A	M	M	C
A	A	M	B	D
A	M	M	M	C
A	M	M	B	D
A	M	B	M	D
A	B	B	A	C
A	B	B	M	D
A	B	B	B	E

Los países con una dependencia de importaciones baja o media, pero en este caso con un indicador de puntos de entrada alto, obtienen un perfil “A”. Los países con una dependencia de las importaciones alta, obtendrán un perfil en función de la Tabla 5.5, que será peor al disminuir los puntos de entrada, al disminuir la diversidad de proveedores o el nivel de almacenamiento.

Carbón

En este caso para la determinación del nivel de riesgo interno del país, se utiliza el indicador de proporción de minería subterránea, no se considera que los stocks del país mejoren la resiliencia ante perturbaciones.

Tabla 5.6: Perfil de seguridad energética del carbón, en función del valor de los indicadores de referencia. Fuente: elaboración propia a partir de (Jewell 2011)

Carbón				
Nivel indicadores				Perfil SE
DI	PE	DP	PMS	
B			B	A
B			M	B
M	M-A		B	A
M	M-A		M	B
A	A	A-M		C
A	M	A-M		D
A	B	B		E

Se considera que la minería subterránea está más expuesta a las perturbaciones que la minería de superficie, debidos a accidentes o huelgas. La producción a cielo abierto es más fácil de ampliar en el caso de una escasez.

Para el carbón el perfil de seguridad solo será alto si la dependencia exterior es baja, o si es media con un nivel medio o alto de puntos de entrada. Si la dependencia es alta el perfil tenderá a ser peor, si disminuyen los puntos de entrada o con poca diversidad de proveedores.

Biomasa y biocombustibles

En el caso de la biomasa solo se utilizan dos indicadores, el de dependencia exterior y el de diversidad de proveedores, el abastecimiento de biomasa puede verse perturbado por incendios, por alteraciones en la recogida de residuos, o por el cierre temporal de plantas depuradoras. La biomasa es normalmente una fuente nacional, por lo que normalmente se está poco expuesto a riesgos externos.

La clasificación por perfiles se hace solo en tres categorías, dada la escasa diversidad de posibilidades. Muy baja dependencia exterior y media diversidad de proveedores implica un perfil “A”, si la dependencia es baja el perfil es “B” y será “C” con una diversidad de proveedores baja.

Los biocombustibles (bioetanol y biodiesel) son evaluados por separado, al igual que los productos del petróleo. En este caso la dependencia exterior y los puntos de acceso son dos variables muy importantes, la diversidad de proveedores no es utilizada porque la información no está disponible. La seguridad sobre la producción nacional se mide con el indicador de volatilidad de la producción agrícola.

Tabla 5.7: Perfil de seguridad energética de la biomasa y los biocombustibles. Fuente: elaboración propia a partir de (Jewell 2011)

Biomasa			
Nivel indicadores			Perfil SE
DI	DP		
MB	M		A
B	M		B
	B		C
Biocombustibles			
Nivel indicadores			Perfil SE
DI	PE	VPA	
B		B	A
B		M	B
M	A-M	B	A
M	A-M	M	A
M	B	B	B
A	A-M		B
A	B		C

Energía Nuclear

La seguridad energética, en relación a la producción de origen nuclear utiliza cuatro indicadores de referencia: la tasa de interrupción no planificada (TI), la edad media de las centrales nucleares (EM), la diversidad de modelos de reactores (DM) y el número de plantas de energía nuclear (NP).

En este caso un perfil elevado de seguridad energética, está asociado con una baja o media tasa de interrupción, con bajas o medianas edades de las centrales y un alto o mediano número de centrales, la diversidad de modelos no influye en los perfiles altos.

La seguridad empeora con el aumento de la tasa de interrupción, con el aumento de la edad de las centrales, con la disminución de la diversidad y con la disminución del número de centrales.

Tabla 5.8: Perfil de seguridad energética de la energía nuclear. Fuente: elaboración propia a partir de (Jewell 2011)

Nuclear				
Nivel indicadores				Perfil SE
TI	EM	DM	NP	
B	B-M	A-B	A	A
B	B-M	A-B	M	B
B	A	B-M	A	C
B	A	B-M	M	D
B	A	B-M	B	E
M	B	A-B	A	A
M	B	A-B	M	B
M	M	B-M	A	C
M	M	B-M	M	D
M	M	B-M	B	E
A	M	M-A	A	C
A	M	M-A	M	D
A	M	M-A	B	E

5.3 Modelos de evaluación integrada.

5.3.1 Modelos de referencia

El carácter limitado de los recursos fósiles y la magnitud de las reservas en relación a la demanda actual, unido a las consecuencias climáticas derivadas de su utilización, implican una necesaria transformación de los sistemas energéticos en el medio y largo plazo, lo que hace necesario, a su vez, un análisis de la seguridad energética a lo largo del tiempo y en un contexto cambiante.

El desarrollo de las herramientas apropiadas para este análisis ha de definir previamente un marco conceptual que resuelva algunas contradicciones en el ámbito de la seguridad energética (Jewell, Cherp, and Riahi 2014a). En primer lugar se requiere de una definición de seguridad energética adecuada a un contexto cambiante, decidir si los aspectos económicos, ambientales o sociales serán tomados en consideración, también se tendrá que decidir la escala adecuada de estudio y la importancia relativa de los diferentes riesgos. En segundo lugar “un método apropiado para evaluar las implicaciones de seguridad energética en las políticas climáticas a largo plazo, debe ser a la vez un reflejo de las preocupaciones políticas y adecuado para los futuros sistemas energéticos que pueden ser radicalmente diferentes a los actuales”.

La evaluación de los impactos climáticos y de la seguridad a largo plazo requiere de modelos cuantitativos que permitan la representación de una gama de futuros posibles, el mayor avance del conocimiento en ese sentido ha sido el desarrollo de los modelos de evaluación integrada (IAMs), estos modelos intentan incorporar procesos clave, naturales y humanos, necesarios para el análisis de las políticas de cambio climático. El análisis integrado se define como “un método de análisis que combina resultados y modelos de la física, las ciencias biológicas, económicas y sociales, y las interacciones entre estos componentes, en un marco coherente para evaluar la situación y las consecuencias de los cambios ambientales y las respuestas políticas a los mismos” (IPCC 2014).

Algunos de los modelos integrados de referencia son los siguientes (Jewell 2013):

- (1) *Global Change Assessment Model (GCAM)*. Es un modelo integrado de evaluación global que integra las interacciones entre la economía global, la energía, la agricultura, los usos del suelo, la tecnología, las emisiones, la atmósfera y el clima. Se ha

desarrollado en el *Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)* desde hace 20 años y ahora es un modelo de comunidad abierta y documentado en línea (GCAM 2012).

- (2) *Integrated Model to Assess the Global Environment (IMAGE)*. Es un modelo integrado de evaluación del sistema Tierra, asume la población y la macroeconomía como los factores clave, establece indicadores físicos para la energía, industria, los usos del suelo, la agricultura, el clima y los ciclos del carbono y el nitrógeno. Es el resultado de muchos años de desarrollo en el *National Institute for Public Health and the Environment (RIVM)*, este trabajo continua en el *Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP)*. Los resultados de IMAGE han jugado un papel clave en estudios a nivel mundial como el Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de emisiones (SRES), la cuarta Perspectivas del Medio Ambiente Mundial del PNUMA (GEO-4), la Evaluación del Milenio de los Ecosistemas (EM), la segunda Perspectiva Mundial sobre Diversidad Biológica, y muchos otros (MNP 2006).
- (3) *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE)*. Es un modelo de optimización de la ingeniería de sistemas utilizado para la planificación a largo plazo, el análisis de la política energética y el desarrollo de escenarios. El modelo proporciona un marco para la representación de un sistema de energía con todas sus interdependencias de extracción de recursos, importaciones y exportaciones, la conversión, el transporte y la distribución, los usos finales de la energía, como la iluminación, la calefacción y la refrigeración, los procesos de producción industrial y el transporte. La estructura del modelo y los resultados proporcionan recursos básicos para las principales evaluaciones y escenarios internacionales de estudios, tales como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el *World Energy Council (WEC)*, el Consejo Asesor Alemán sobre el Cambio Mundial (WBGU), la Comisión Europea y más recientemente el *Global Energy Assessment (GEA)* (Hainoun, Seif Aldin, and Almoustafa 2010; IIASA 2014; Klaassen and Riahi 2007; Messner and Schrattenholzer 2000; Riahi et al. 2012).
- (4) *Regional Model of Investments and Development (REMIND)*. Es un modelo global multiregional que incorpora la economía, el sistema climático y una representación detallada del sector de la energía. Soluciona un óptimo de Pareto inter-temporal de las inversiones económicas y energéticas en las regiones del modelo, con el fin de justificar el comercio interregional de bienes, productos energéticos y derechos de emisión. Permite el análisis de opciones tecnológicas y propuestas de políticas para la mitigación del clima. Se ha aplicado a un número importante de proyectos de investigación (Bauer, Baumstark, and Leimbach 2011; Bauer, Edenhofer, and Kypreos 2007; Leimbach et al. 2009; Luderer et al. 2012, 2013; S. Zhang et al. 2014).
- (5) *TIMES Integrated Assessment Model (TIAM)*. El modelo *The Integrated MARKAL – EFOM System (TIMES)*, fue desarrollado y es mantenido por el *Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP)*, un acuerdo de implementación en el marco de la Agencia Internacional de Energía (IEA). El modelo de evaluación integrada TIAM es la formulación multiregional del generador de modelos TIMES. Es un generador de modelos de sistemas de energía local, nacional y regional. Se aplica al análisis total o parcial del sector de la energía. El usuario proporciona estimaciones de las existencias de equipos relacionados con la energía en todos los sectores en el año base, y las características de las futuras tecnologías disponibles, así como las fuentes actuales y futuras de suministro de energía primaria y de sus potencialidades. El modelo tiene como objetivo proporcionar servicios de energía a un costo mínimo global (ETSAP 2011; Keppo and Zwaan 2011; Loulou and Labriet 2007; Loulou 2007).

- (6) *World Induced Technical Change Hybrid model (WITCH)*. Desarrollado por la *Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM)*, es un modelo de evaluación integrada diseñado para evaluar los impactos de las políticas de cambio climático en los sistemas económicos mundiales y regionales y para brindar información sobre las respuestas óptimas de estas economías al cambio climático. Se consideran doce regiones que interactúan estratégicamente utilizando teoría de juegos. Se basa en un modelo de crecimiento económico dinámico en el que el componente energético de la función de producción agregada se ha ampliado para describir el sector de la energía y para modelar las opciones de mitigación de carbono de los principales gases de efecto invernadero (Bosetti et al. 2007, 2009; Cooke, Keppo, and Wolf 2013; FEEM 2010).

5.3.2 Marco conceptual

El marco conceptual fundamental para la elaboración de esta tesis queda recogido en el *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future (GEA)* (GEA 2012), un informe elaborado por el *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)*, ha sido coordinado por algunos de los principales expertos mundiales en energía, procedentes de diferentes ámbitos como la investigación, la academia, los negocios, la industria y la política. Es la primera evaluación integrada de la energía que analiza los desafíos energéticos, las oportunidades y las estrategias para el desarrollo, tanto en países desarrollados como emergentes. Propone análisis relevantes para la política, los gobiernos y los sectores comerciales, que son pertinentes a las instituciones académicas. No obstante esta no será una referencia exclusiva y será tomada en consideración la información publicada en relación a cada tema.

GEA toma como modelo de referencia para una evaluación integra el MESSAGE, descrito anteriormente, desarrolla la base conceptual a incorporar al modelo (Cherp et al. 2012; Jewell, Cherp, and Riahi 2014a; Riahi, Grübler, and Nakicenovic 2007; Riahi et al. 2012), y lo utiliza en el proyecto *Low climate Impact scenarios and the Implications of required Tight emission control Strategies* (LIMITS 2014).

5.3.3 Definición operativa de seguridad energética

En el marco de este estudio se define la seguridad energética como "baja vulnerabilidad de los sistemas vitales de energía" (Jewell, Cherp, and Riahi 2014a), se trata de una definición flexible que puede adaptarse a diferentes realidades y a los cambios tecnológicos. La definición utilizada en GEA define la seguridad energética como "la protección de las interrupciones de los servicios vitales de energía a nivel nacional" (Cherp et al. 2012). Estas dos definiciones contienen matices diferentes, la segunda hace referencia explícita al ámbito nacional, porque se entiende que es un ámbito esencial en el desarrollo de políticas de seguridad, sin embargo los IAMs dedicados al estudio del clima se han desarrollado esencialmente para los ámbitos regionales y globales, que son también esenciales en el estudio de la seguridad energética.

En el primer caso se vincula la seguridad a los sistemas de energía y en el segundo a los servicios de energía. Los servicios de energía son la parte esencial de todo el sistema energético, se concretan en los usos finales de la energía, en el ámbito de los edificios, la movilidad de personas y mercancías, y los sistemas productivos. Entendiendo que la función esencial del sistema es la prestación de servicios, que la seguridad se expresa en relación a la continuidad de estos servicios y que la seguridad depende del conjunto del sistema, podemos considerar que en ese sentido las dos definiciones son equivalentes.

Este marco conceptual interpreta también la seguridad energética desde las diferentes dimensiones que la definen, estas, como se ha visto, son la soberanía que desde una visión geopolítica está dedicada básicamente a asegurar la seguridad de abastecimiento, la robustez

que desde una visión de la ingeniería trata de asegurar la fiabilidad de los sistemas, y la resiliencia que desde una visión sistémica trata de asegurar la capacidad de resistir y recuperarse del sistema energético ante perturbaciones (Cherp and Jewell 2011).

Esta definición de la seguridad es el punto de partida para poder concretar el marco conceptual, en el que tenemos que definir cuáles son estos sistemas vitales de energía, cuáles son las vulnerabilidades de cada uno de ellos y cuáles los indicadores de medición.

5.3.4 Sistemas vitales de energía

Los servicios energéticos vitales son aquellos que son necesarios para el funcionamiento estable de las sociedades modernas. Inherente a esta definición es la noción de que los gobiernos y la sociedad perciben la interrupción de estos servicios como un problema de seguridad nacional (Cherp et al. 2012). La seguridad de estos servicios depende de la vulnerabilidad de las fuentes de energía y las infraestructuras para la conversión y transmisión de energía, que en su conjunto conforman los sistemas vitales de energía.

Estos sistemas vitales han de ser definidos de tal manera que estas definiciones no queden obsoletas en una evaluación de largo plazo, y por tanto que permanezcan aún en un proceso de profunda transformación de los sistemas energéticos. Pueden ser definidos en base a sus límites geográficos o a sus límites sectoriales, en relación a los primeros se utilizan tres niveles de estudio, el nacional, el regional y el global, en estos tres niveles se producen procesos que tienen que ver con la seguridad, los diferentes mercados de la energía pueden definirse y operar en diferentes niveles según el caso, las redes de transporte y distribución operan también en estos niveles, y la política energética y la regulación de los sistemas se decide normalmente en los ámbitos nacionales o regionales, pero el ámbito global es un espacio de permanente negociación y establecimiento de acuerdos.

Los ámbitos sub-nacionales no suelen ser determinantes en el establecimiento de la regulación energética, que corresponde a los ámbitos nacionales y regionales, pero en un proceso de transformación del sistema hacia una mayor afirmación de la producción descentralizada y la eficiencia energética, las políticas sub-regionales e incluso locales, pueden ser importantes en la seguridad. No obstante dado que una condición básica para la evaluación es la existencia de información, este ámbito sub-regional no es considerado en la evaluación de la seguridad en el futuro.

Tabla 5.9: Sistemas vitales de energía para la evaluación de la seguridad energética. Fuente (Cherp et al. 2012; Jewell, Cherp, and Riahi 2014b).

	Límites geográficos	Límites sectoriales		
		Fuentes de energía	Vectores energéticos	Usos finales
Presente	Sub-nacional, nacional, regional y global	Petróleo, gas natural, energía hidroeléctrica, nuclear, biomasa, las fuentes de energía renovables (FER)	Los derivados de petróleo, biocombustibles, energía eléctrica	Transporte, la industria, los edificios, las exportaciones
Futuro	Nacional, regional, global	Petróleo, gas natural, energía hidroeléctrica, nuclear, biomasa, FER	Los derivados del petróleo, combustibles sintéticos, hidrógeno, electricidad, biocombustibles	Transporte, industria, residencial y comercial, las exportaciones

La definición de los subsistemas vitales se hace en base a una definición de límites sectoriales que los clasifica en fuentes de energía, vectores energéticos o portadores energéticos y usos finales. Las fuentes que se consideran como determinantes en el futuro que podemos considerar

evaluables son las mismas que en el presente: petróleo, gas natural, energía hidroeléctrica, nuclear, biomasa y las fuentes de energía renovables (FER), entendiendo por FER las nuevas fuentes renovables. Los vectores energéticos (*carriers*) utilizados son los productos del petróleo, los biocombustibles y la electricidad, a los que se suman los combustibles sintéticos y el hidrógeno. Y para los usos finales se usan como sectores de referencia el transporte, la industria, el sector residencial y comercial y las exportaciones.

5.3.5 Indicadores para evaluaciones a largo plazo

Los indicadores de seguridad energética se pueden utilizar con el fin de comparar la situación de diferentes países, para trazar la evolución de la seguridad energética en el tiempo, para analizar los efectos de diferentes políticas, para determinar los elementos críticos en la seguridad futura o para evaluar las conexiones entre seguridad energética y cambio climático. Estas diferentes motivaciones pueden priorizar el uso de unos u otros indicadores.

Se han propuesto cientos de indicadores de seguridad energética en docenas de artículos científicos y documentos de política energética (algunos de ellos recogidos en la Tabla 5.1), pero sólo un pequeño número de ellos son relevantes para la evaluación de la seguridad energética, la Tabla 5.10 recoge la selección propuesta por (Jewell 2013), analizados, contrastados y clasificados según a la dimensión de la seguridad a que corresponden.

Tabla 5.10: Los indicadores de la seguridad energética en los escenarios energéticos a largo plazo. Fuente (Jewell 2013).

Indicador	Preocupación por la seguridad energética	Unidad	Definición	Sector	Escala geográfica
Indicadores Soberanía					
El comercio mundial de energía (absoluto)	La interrupción de los flujos comerciales por diversos factores	Ej / año	El total de flujos de comercio entre regiones de un año determinado	TPES, petróleo, gas, carbón, hidrógeno, biomasa, combustibles sintéticos, electricidad, uranio, productos derivados del petróleo, otros combustibles y transporte	Global
El comercio mundial de energía (intensidad)	Igual que el anterior	Compartir (0-1)	El comercio mundial de energía dividida por la oferta mundial de energía	Igual que el anterior (sólo TPES utilizado en este artículo)	Global
La diversidad geográfica de las exportaciones	Igual que el anterior	Adimensional	SwDI o HHI	Como anteriormente	Global
La dependencia de importaciones netas	Vulnerabilidad regional al comercio interrupciones por diversos factores	acción (0-1)	Importaciones netas de energía dividido por el total de PES o total de energía primaria de una fuente determinada	Igual que el anterior (sólo TPES utilizado en este artículo)	Regional
El costo de las importaciones de energía en relación al PIB	Vulnerabilidad regional al comercio interrupciones por diversos factores	Compartir (0-1)	Valor de las importaciones de energía dividido por el PIB	TPES o un combustible particularmente vulnerables	Regional
El costo de las exportaciones de energía en relación con el PIB	Vulnerabilidad regional a las interrupciones de las exportaciones de energía	Compartir (0-1)	Valor de las exportaciones de energía dividido por el PIB	TPES	Regional
La dependencia de los combustibles importados <i>Carriers</i>	Vulnerabilidad de los <i>carriers</i> de las interrupciones del	Compartir (0-1)	Participación de los portadores de energía a partir de	Electricidad, hidrógeno y otros transportistas	Regional

	comercio		fuentes importadas dividido por el transportista energía total		
Dependencia de los sectores de uso final de los combustibles importados	Vulnerabilidad de los sectores de uso final a las interrupciones del comercio	Compartir (0-1)	Participación de los sectores de uso final producidos a partir de combustibles importados	Transporte, industria, residencial y comercial	Regional
Indicadores de resiliencia					
La intensidad energética	Vulnerabilidad general para el suministro de energía y de los precios	MJ / \$ PIB	TPES dividido por el PIB	TPES	Global o Regional
Diversidad de las fuentes de energía en el suministro de energía primaria (PES)	Vulnerabilidad general a varias interrupciones de fuente de energía primaria	Adimensional	SwDI o HHI	TPES	Global o Regional
Diversidad de las fuentes de energía primaria en los <i>carriers</i>	Vulnerabilidad de los <i>carriers</i> a diversas perturbaciones fuente de energía primaria	Adimensional	SwDI o HHI	Electricidad, hidrógeno, combustibles líquidos, y otros portadores	Global o Regional
Diversidad de las fuentes primarias de energía en los sectores de uso final	Uso final vulnerabilidad a diversas perturbaciones fuente de energía primaria	Adimensional	SwDI o HHI	Transporte, industrial, residencial y comercial	Global o Regional
La diversidad de los <i>carriers</i> en el sector de uso final	como anteriormente	Adimensional	SwDI o HHI	Transporte, industrial, residencial y comercial	Global o Regional
Indicadores de robustez					
Ratio de reserva o recursos con la producción	La vulnerabilidad a los <i>shocks</i> energéticos	Años	Las reservas o recursos divididos por los índices de producción	Petróleo, gas y carbón	Global o Regional
El promedio de edad de la infraestructura	Fiabilidad de la conversión de energía y transmisión	Años en relación con la proyectada para toda la vida	La edad de todos los servicios de infraestructura	Transmisión de electricidad y la generación; potencialmente otros vehículos o combustibles	Mundial o regional
Capacidad de reserva para la generación de electricidad	La fiabilidad de la generación de electricidad	%	La capacidad instalada dividida por la carga crítica o media	Electricidad	Regional
Tasa de crecimiento del sector de la energía	Carga para los sistemas de energía asociados con el crecimiento rápido	% / Año	El crecimiento de la oferta de energía (o uso) en el combustible, vehículo o el uso final	Usos finales, los transportistas, los sectores	Mundial o regional
Tasa de disminución de los ingresos de exportación de energía	La inestabilidad asociada con la rápida disminución de los ingresos de exportación de energía	% / Año	El cambio en la exportación de energía Ingresos año en año	Las exportaciones de energía	Regional
Indicadores compuestos					
Índice de diversidad Compuesto	Combinado diversidad y soberanía preocupaciones	Adimensional	SWDI modificado	TPES	Regional

6 OBJETIVOS DE LA TESIS

6.1 Preguntas de investigación

Esta tesis se desarrolla dentro del marco de la evaluación de la seguridad energética de los sistemas de energía, y pretende abordar la respuesta a dos preguntas de investigación relacionadas con la seguridad energética de los países. La primera es ¿cómo afectará a la seguridad energética el proceso de agotamiento del petróleo y del gas? Se trata de una pregunta principal enmarcada en un contexto general de incerteza, derivada por una parte de la naturaleza propia de los sistemas sociales complejos, en los que la evolución de la demanda energética depende de la evolución de la población, de la evolución económica, de las fuentes de energía utilizadas, de los sistemas de conversión y transporte, y de la demanda agregada en los diferentes sistemas de consumo. A lo anterior también se agrega la incerteza en la determinación de las reservas disponibles, motivada por el carácter probabilístico de las reservas disponibles y por el sesgo político de los datos reportados por los gobiernos y las grandes empresas.

La segunda pregunta es ¿cómo contribuye el mercado eléctrico a la seguridad del sistema eléctrico y a la seguridad energética de un país?, y relacionado con ello ¿cuáles son las principales vulnerabilidades e indicadores de riesgo de estos mercados? Los mercados eléctricos no figuran entre los sistemas vitales de energía definidos en el *Global Energy Assessment*, ver Tabla 5.9, aunque sí quedan implícitamente integrados en la evaluación de la seguridad del suministro eléctrico, asociada a los sistemas de generación y distribución de electricidad. Según GEA los mercados están estrechamente vinculados a la resiliencia del sistema energético, en ellos los procesos de liberalización, desregulación y la diversidad de actores son considerados la base de la seguridad de abastecimiento.

6.2 Objetivos generales y parciales

La dimensión y la complejidad que supone la evaluación de la seguridad energética de los sistemas nacionales de energía, y de sus aspectos regionales y globales, escapa a las posibilidades de esta investigación. Tal como se ha indicado en el apartado anterior y se desprende de las preguntas de investigación, la tesis solo abordará de forma parcial esta evaluación, a partir del estudio de dos aspectos vitales para esta seguridad.

El primero de ellos es la evaluación de las implicaciones en la seguridad energética del *peak-oil* del petróleo y el gas. Varios motivos justifican esta decisión:

- (1) El petróleo y el gas suponen el 53% de la demanda global de energía (IEA 2013). En el escenario *New Policies Scenario* de la IEA, la demanda de petróleo se incrementará en un 16,0% hasta 2035 y la de gas en un 47,7%. La demanda de esas dos fuentes de energía primaria representará en 2035 el 50,5% de la demanda total. Robert Hirsch (2005) indica que es posible que el *peak-oil* no se produzca en varias décadas, pero también es posible que ocurra en un futuro próximo. El mundo nunca ha enfrentado un problema como éste, y el hecho de no actuar de manera oportuna pueden tener un impacto perjudicial sobre la economía mundial.
- (2) La seguridad energética en el medio y largo plazo aún seguirá estando fuertemente condicionada por el comportamiento de estas dos fuentes de energía. El abastecimiento de petróleo será determinante en el funcionamiento de los sistemas de transporte, y el gas lo será en la producción de electricidad, en la industria y en general en los sistemas urbanos.

- (3) Las previsiones de la IEA presuponen la existencia de reservas suficientes de petróleo y de gas para abastecer la nueva demanda y cubrir el agotamiento de los campos actuales de producción. Pero como el descubrimiento de nuevas reservas es una actividad sujeta a la incerteza, esta dimensión debería de estar incorporada a la formulación de escenarios. Por lo que una nueva pregunta podría ser formulada, ¿cuál es la probabilidad de que pueda cumplirse con las expectativas formuladas en el *New Policies Scenario*?

Por tanto esta tesis se plantea como primer objetivo la evaluación de la seguridad energética de los países asociada al abastecimiento de estos dos combustibles. Este objetivo se concreta en ocho sub-objetivos:

- 1.1) Analizar el tratamiento de las reservas, la producción y la previsión de demanda en los modelos de evaluación integrada de referencia, ver apartado 5.3.1.
- 1.2) Estudiar conceptos como: reservas, estimación de *ultimately recoverable resources* (URR), tasas de agotamiento de las reservas, crecimiento de las reservas y tasas de retorno energético.
- 1.3) Determinación de las reservas disponibles en los diferentes países productores, esta estimación estará asociada a un nivel de probabilidad que podrá variar entre los límites de las reservas probadas P1, las reservas probables P2 y las reservas posibles P3, entre los límites de probabilidad P10 a P90.
- 1.4) Construir las bases de un modelo que permita simular los procesos de agotamiento en cada país productor, y la evolución agregada de la producción a nivel regional y global.
- 1.5) Dibujar escenarios de demanda por países, a partir de la evolución económica, la demanda sectorial y agregada, y la evolución de las diferentes fuentes primarias. Calcular las importaciones y exportaciones, en relación a escenarios de comercio internacional basados en precio/capacidad de pago.
- 1.6) Evaluar diferentes escenarios, a partir de diferentes probabilidades de reservas y diferentes estrategias de política energética, mediante los indicadores de soberanía, robustez y resiliencia, para cada uno de los países estudiados.
- 1.7) Evaluar el volumen de población desabastecida en cada escenario y por países.
- 1.8) Discutir los resultados, en relación a las previsiones establecidas por los modelos de evaluación integrada de referencia (apartado 5.3.1).

El segundo objetivo se refiere a la evaluación de la seguridad energética de los mercados eléctricos. Varios motivos justifican también esta decisión.

El consumo de electricidad es el 17,7% del consumo global de energía final, y el 22,0% en los países de la OCDE. En los últimos diez años el consumo ha crecido un 39% a nivel global y según el escenario *New Policies Scenario* de la IEA, la demanda se incrementará en un 70,8% entre 2011 y 2035. En esa fecha el consumo global de electricidad será el 22,5% del total de consumo de energía final. La electricidad será la segunda fuente de abastecimiento energético después del petróleo (IEA 2013).

El crecimiento del consumo eléctrico, incrementa la dependencia de los países de su sistema eléctrico y aumenta los riesgos y los costes derivados de las perturbaciones a que pueda estar sometido. Crece por tanto la importancia del suministro seguro de electricidad en sectores vitales para la sociedad como son las comunicaciones y la gestión de la información, la movilidad o el funcionamiento de los sistemas productivos y los servicios públicos. Esta dependencia se extiende en la medida que más países progresan en su electrificación, y esta penetra en nuevos sectores económicos desplazando a otros productos energéticos (GEA 2012). El nivel medio de interrupciones del suministro eléctrico en todos los países es de 5,6 interrupciones mensuales, equivalentes a 2,8 horas mensuales (The World Bank 2014).

El suministro eléctrico está sometido a diferentes fuentes de riesgo, relacionadas con la fiabilidad de los elementos constitutivos de los sistemas de distribución; con la interacción entre estos sistemas formando redes complejas; con la operación de estos sistemas técnicos, en los que la producción ha de estar en todo momento sincronizada con la demanda; y con la operación de mercados en los que han de resolverse todos los intercambios mercantiles que determinan todas las transacciones energéticas que se realizarán en cada instante. Todos estos procesos han de estar soportados sobre todo un entramado normativo de enorme complejidad, cuyas lagunas también pueden transformarse en una fuente de riesgo, derivada de la operación del sistema y de una falta de incentivos para anticipar riesgos futuros por falta de capacidad o envejecimiento de instalaciones. Además la producción de electricidad es el resultado de una cartera de productos primarios más o menos diversos y dependientes de importaciones, que inevitablemente también condicionan la seguridad de todo el sistema.

En el apartado 3.1 se ha analizado el papel del mercado en la definición de seguridad energética. Los procesos de liberalización del sector de la energía en general y del sector eléctrico en particular se ponen en marcha en Europa a partir de la Directiva 96/92/ce del Parlamento europeo y del Consejo, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. Esto se hace con el argumento de que “el establecimiento del mercado interior en el sector de la electricidad se revela particularmente importante para la racionalización de la generación, la transmisión y la distribución de la electricidad, al tiempo que se refuerza la seguridad del abastecimiento y la competitividad de la economía europea, respetando la protección del medio ambiente”. Esta directiva sienta las bases de los mercados eléctricos liberalizados en Europa y establece normas comunes en materia de generación, transmisión y distribución de electricidad. Define las normas relativas a la organización y el funcionamiento del sector de la electricidad, el acceso al mercado, los criterios y procedimientos aplicables a las licitaciones y la concesión de las autorizaciones, así como la explotación de las redes (Union 1997).

La justificación del estudio del mercado eléctrico como segundo objetivo de la tesis responde también a una necesidad concreta planteada por Jewell (2011). “Mientras que la seguridad del suministro es importante, en última instancia, los consumidores y los responsables políticos están más preocupados por la seguridad de los servicios de energía, por lo que la incorporación de la electricidad y usos finales en MOSES será un paso clave en la provisión de análisis relevante para la política de seguridad energética... La AIE está en el proceso de extender el análisis a la electricidad y usos finales, lo que se reflejará en las versiones posteriores de MOSES”. El estudio de la seguridad de los mercados eléctricos pretende ser una contribución a ese proceso.

Sin embargo este segundo objetivo, dentro del alcance de esta tesis, solo podrá ser abordado de forma parcial. La formulación concreta de este objetivo es la siguiente: establecer los objetivos y desarrollar los procedimientos metodológicos para abordar el estudio del mercado eléctrico, en relación a la seguridad energética del sistema eléctrico en su conjunto. Por tanto en el marco de esta tesis no se tratará la seguridad energética en relación a los aspectos técnicos de la producción, la distribución y el consumo, sino los aspectos relacionados con la gestión del sistema y la operación del mercado. Por tanto, en cuanto a los resultados solo se pretende alcanzar un planteamiento de los problemas y una concreción de los objetivos y la metodología a utilizar en ese estudio. Este objetivo general se concreta en tres sub-objetivos:

- 2.1) Analizar los objetivos y la justificación de los procesos de liberalización del sector eléctrico, estudiar el proceso de implantación de los mercados eléctricos en el contexto europeo, y estudiar las deficiencias y limitaciones de estos procesos.
- 2.2) Estudiar las vulnerabilidades del sistema eléctrico en su conjunto y del mercado eléctrico en particular.

- 2.3) Desarrollar una metodología para la evaluación de la seguridad energética de los mercados eléctricos nacionales.

7 METODOLOGÍA

7.1 Fuentes de información

El desarrollo de esta tesis tomará en consideración de forma exhaustiva y crítica la información académica publicada, aunque como marco conceptual de referencia utiliza algunos estudios que intentan recopilar, ordenar y en cierto modo exponer las ideas predominantes y también las discrepancias en diferentes ámbitos de la energía. Entre estos trabajos de referencia cabe destacar los siguientes:

- *Global Energy Assessment-Toward a Sustainable Future (GEA)*. Publicado en 2012 por el *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)* (GEA 2012). Ha sido presentado en el apartado 5.3.2 de este documento. Es el resultado de cuatro grupos de trabajo formados por especialistas de referencia internacional; el primero dedicado a la identificación y definición de los principales problemas mundiales de la energía; el segundo al estudio de los recursos energéticos y las opciones tecnológicas; el tercero dedicado a describir los diferentes escenarios posibles de un futuro sostenible y el cuarto dedicado a la evaluación de políticas energéticas para enfrentar los retos presentes y avanzar hacia un desarrollo sostenible.
- *Global Oil Depletion: An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production*. Publicado en 2009 por el *UK Energy Research Centre (UKERC)* (UKERC 2009a), un centro creado para la evaluación de tecnologías y políticas energéticas desde una visión integral. El informe se basa en una revisión exhaustiva de la situación actual de los conocimientos sobre el agotamiento del petróleo, complementada con el análisis de datos y guiado por un grupo de expertos. Los estudios desarrollados se presentan en siete informes en los que se establecen las definiciones pertinentes sobre el debate del “peak-oil”, se identifica las fortalezas y debilidades de los diferentes métodos para estimar el tamaño de los recursos de petróleo y de la previsión de la oferta futura. El informe trata de responder a la pregunta sobre ¿qué evidencia existe para apoyar la tesis de que la oferta mundial de “petróleo convencional” se verá limitada por el agotamiento físico antes de 2030?
- Se utilizará como principal fuente de información sobre reservas las *National Oil & Gas Assessment* y las *World Petroleum Assessment* publicadas por el *Energy Resources Program* de la *United States Geological Survey (USGS)* (USGS 2014). En particular las evaluaciones: 1995 *USGS National Assessment of United States Oil and Gas Resources* (DDS-30) y la 2000 *USGS World Energy Assessment* (DDS-60). En todos los casos se trabajará con información publicada y de acceso gratuito.
- También se utilizarán como publicaciones periódicas de referencia prioritaria los *World Energy Outlook (WEO)* de la *International Energy Agency (IEA)*, el *World Energy Resources* del *World Energy Council*, los *International Energy Outlook* del *U.S. Energy Information Administration (EIA)*, y el *BP Statistical Review of World Energy* de *British Petroleum*.

7.2 Referencias geográficas, temporales y sectoriales para la evaluación

Escala geográfica

La seguridad energética es tratada como una cuestión estratégica de seguridad nacional por la mayoría de los países, es en esta escala donde mayoritariamente se define la política energética y la regulación energética. Pero los ámbitos regionales son también espacios preferentes para los intercambios energéticos, en ocasiones funcionan como mercados regionales y en ellos se pueden desarrollar políticas energéticas concertadas. También las redes eléctricas, gasoductos y oleoductos se interconectan y gestionan dentro de esta escala regional. Sin embargo los mercados energéticos, sobre todo el petróleo, y no tanto el gas (aunque los gases licuados están abriendo posibilidades), operan a escala global. Por tanto la modelización de escenarios debe de poder hacerse en estas tres escalas.

Escala temporal

Las implicaciones de la energía sobre el clima, o sobre el medio ambiente y los ecosistemas, puede prolongarse por décadas, y esta sería la escala temporal adecuada, sin embargo la seguridad energética puede realizarse en escalas diferentes dependiendo de los aspectos considerados. La seguridad asociada a la operación y la gestión de los sistemas ante perturbaciones transitorias puede desarrollarse en escalas desde segundos a días o meses, las reservas estratégicas de petróleo o gas no superan los 90 días. Los temas relacionados con la fiabilidad de las instalaciones, la volatilidad, la evolución de los mercados, puede tener escalas de meses o años, y problemas relacionados con la sustitución de instalaciones de producción la diversificación de fuentes, los problemas de dependencia exterior o el agotamiento de combustibles, puede desarrollarse en escalas de años o décadas (Jewell 2013).

Normalmente los planes de actuación que rigen la política vienen condicionados por la duración limitada de los mandatos de gobierno, y en ocasiones del número de mandatos, y aunque estos planes están necesitados de visiones estratégicas, raramente se extienden más allá de horizontes de 10 años. Por otra parte, estos planes deben de responder a problemas planteados, con recursos, tecnologías y contextos económicos previsibles. La elección de escenarios más extensos incrementaría las incertezas hasta el punto de restar credibilidad a las propuestas de actuación. No obstante estos planes de actuación deben de estar basados en estrategias, hojas de ruta o escenarios con horizontes temporales superiores a la duración de estos planes.

Los escenarios de futuro desarrollados por las agencias internacionales, los institutos de investigación o las áreas específicas de los gobiernos, suelen tener horizontes de algunas décadas. Los *global energy trends* del *World Energy Outlook 2013* de la *International Energy Agency* tienen el horizonte de 2035, el *Energy Technology Perspectives 2014* abarca hasta 2050, las proyecciones de *International Energy Outlook 2013* de la *U.S. Energy Information Administration* tienen como horizonte 2040, y la *EU energy trends* de la *European Union* tiene como horizonte 2030, el *Energy Outlook* de BP tiene como horizonte 2035.

En esta tesis el horizonte temporal de los estudios será el año 2035, con el fin de hacerlos compatibles con los escenarios de la IEA, este escenario se podría replantear en caso de revisión del horizonte temporal en el *World Energy Outlook 2014*.

Escala sectorial

Los ámbitos sectoriales de estudio en la tesis, tal como ha quedado definido en los objetivos se refieren al ámbito del petróleo y del gas y al sector eléctrico, principalmente en lo referido al mercado eléctrico.

7.3 Indicadores de referencia

Los indicadores de referencia para evaluar la seguridad energética serán los propuestos por Jessica Jewell (Jewell 2013), en el marco de *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future (GEA)*, y tratados en el apartado 5.3.5.

Estos indicadores serán revisados en el desarrollo de la tesis, seleccionados en función de su idoneidad para los sectores estudiados, y ampliados en caso de considerar la necesidad de evaluar otras variables.

Tabla 7.1: Indicadores de referencia propuestos de forma preliminar. Elaboración propia, fuente (Jewell 2013).

Indicadores de soberanía
El comercio mundial de energía (absoluto)
El comercio mundial de energía (intensidad)
La diversidad geográfica de las exportaciones
La dependencia de importaciones netas
El costo de las importaciones de energía en relación al PIB
El costo de las exportaciones de energía en relación con el PIB
La dependencia de los combustibles importados <i>carriers</i>
Dependencia de los sectores de uso final de los combustibles importados
Indicadores de resiliencia
La intensidad energética
Diversidad de las fuentes de energía en el suministro de energía primaria (PES)
Diversidad de las fuentes de energía primaria en los <i>carriers</i>
Diversidad de las fuentes primarias de energía en los sectores de uso final
La diversidad de los <i>carriers</i> en el sector de uso final
Indicadores de robustez
Ratio de reserva o recursos con la producción
El promedio de edad de la infraestructura
Capacidad de reserva para la generación de electricidad
Tasa de crecimiento del sector de la energía
Tasa de disminución de los ingresos de exportación de energía
Indicadores compuestos
Índice de diversidad Compuesto

7.4 Los modelos de agotamiento de Hubbert y Laherrere.

King Hubbert fue un geofísico estadounidense que trabajó como tal en el laboratorio de investigación de la compañía Shell entre 1943 y 1964, y desde entonces hasta 1976, como experto del USGS, publicó en 1956 el artículo *Nuclear energy and the fossil fuels* (Hubbert 1956) en el que aborda el futuro de la extracción de los combustibles fósiles. En aquel momento unas decenas de grandes campos petrolíferos y cientos de pequeños habían sido descubiertos en EE.UU. La pregunta obligada era ¿qué tan lejos estamos de completar la explotación?, en cierto modo una pregunta incómoda que advertía sobre la limitación de los recursos en plena euforia expansiva.

El ciclo de explotación del petróleo según Hubbert se inicia lentamente y luego se eleva de forma pronunciada, hasta un punto de inflexión después del cual la curva se hace cóncava con una tasa de crecimiento que tiende a disminuir. Para poder representar esa evolución característica formuló dos consideraciones, la primera indica que la tasa de producción será igual a cero cuando el tiempo de referencia es cero, y también lo será cuando se haya agotado el recurso, entre estos dos puntos la producción habrá evolucionado alcanzando un valor máximo en algún momento. La segunda consideración indica que, si conocemos el volumen de reservas disponibles, podríamos trazar diferentes curvas que contendrían este volumen y que empezarían

y acabarían en cero, algunas de estas curvas se adaptarían mejor que otras a la evolución histórica, esto nos permitiría proyectar al futuro esta evolución.

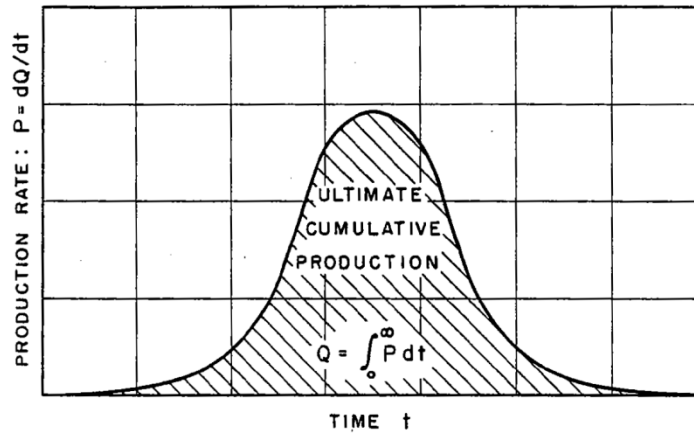


Figura 7.1: Ciclo de explotación de un recurso agotable. Fuente (Hubbert 1956)

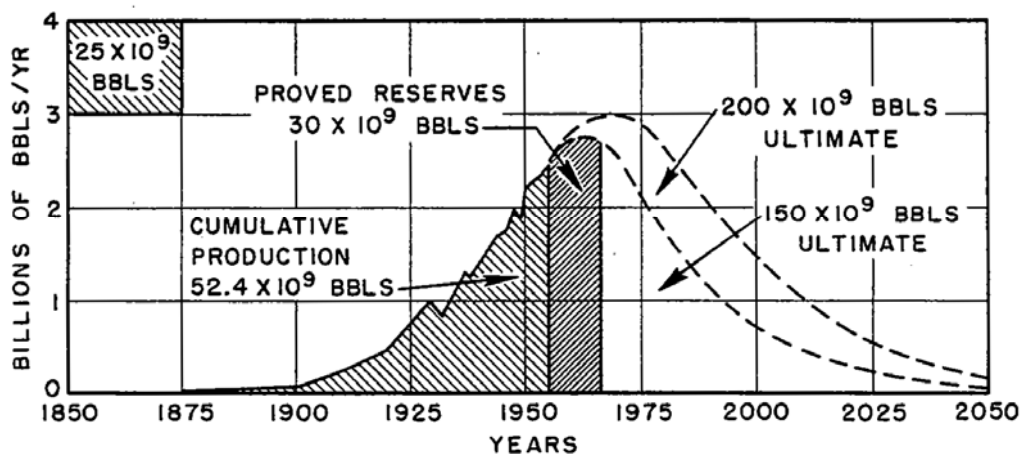


Figura 7.2: Producción de petróleo en EEUU suponiendo unas reservas últimas aprovechables de 150 y 200 Gb de petróleo. Fuente (Hubbert 1956)

Este método pronosticó que la producción en EE.UU., para unas reservas de 200 Gb¹², alcanzaría un máximo alrededor de 1970, con una producción de 3 Gb/año. Estos pronósticos no fueron escuchados hasta que se produjo una declinación súbita de la capacidad de producción en el año 1971. La consiguiente crisis de abastecimiento fue afrontada incrementando las importaciones desde otros países productores, una alternativa no viable cuando el problema se plantea a escala global.

Un medio eficaz para la extrapolación de las curvas de crecimiento parte de dos consideraciones básicas: la primera es que para cualquier curva de producción de un recurso finito de valor fijo, dos puntos se conocen desde el principio, la tasa de producción será igual a cero cuando el tiempo de referencia es cero, y la tasa será de nuevo cero cuando se haya agotado el recurso. Es decir, en la producción de cualquier recurso de magnitud fija, la tasa de producción debe

¹² Thousand million barrels.

comenzar en cero, y a continuación, después de pasar por uno o varios valores máximos, se debe disminuir de nuevo a cero. La segunda consideración se deriva del teorema fundamental del cálculo integral, es decir, si existe una función de producción $p = f(t)$, entonces.

$$U = \int_0^t p \cdot dt \quad (8)$$

Donde U es el área entre la curva $p = f(t)$ y el eje de tiempos, entre el origen y el tiempo t .

Por consiguiente, si conocemos el volumen total de recursos explotables, podríamos dibujar una familia de curvas de producción posibles, con la característica común de inicio y final en cero, y que abarquen un área igual a la cantidad estimada. Unas curvas se ajustarán mejor que otras a la trayectoria de la producción real, lo cual permite una selección de estas.

En 1980 Hubbert propondría que la producción de petróleo seguirá un comportamiento logístico similar al comportamiento de las poblaciones, la derivación de la curva logística permite calcular el comportamiento de la producción (Hubbert 1980; UKERC 2009b).

$$Q(t) = \frac{U}{1 + e^{-b(t-tm)}} \quad (9)$$

En la que $Q(t)$ es la producción acumulada en el tiempo t , U es el total de reservas recuperables, b determina la distribución de la curva y tm es el tiempo en el que la curva tiene una pendiente máxima, que corresponderá con el momento de máxima producción, que a su vez es el punto de inflexión de la curva de producción.

La derivada de esta ecuación permite calcular la producción, que puede ser expresada como.

$$P = \frac{2 \cdot Pm}{1 + \cosh^{-b(t-tm)}} \quad (10)$$

Donde Pm es la producción anual máxima que se produce en el tiempo tm . El término b viene determinado por $4Pm/U$ (Laherrere 1997).

Un proceso histórico de producción podrá ser representado por un conjunto de curvas definidas cada una de ellas a partir de un volumen de reservas, un año de producción máxima y un valor correspondiente a esa producción máxima.

Los métodos de representación propuestos tiene algunas limitaciones, por lo general la curva de producción de un campo es asimétrica, mientras que la curva de Hubbert es simétrica, aunque la suma de un gran número de distribuciones asimétricas se convierte en simétrica (normal), según el teorema central del límite de las estadísticas. La teoría tampoco permite representar acontecimientos políticos que pueden distorsionar la evolución de la producción, ni los efectos que sobre esta puede tener la explotación compartida de campos por varios productores.

7.5 Algunos resultados preliminares

En una primera aproximación se ha desarrollado un estudio preliminar sobre las reservas disponibles en los diferentes países (ver Tabla 7.2). Se trata de una primera síntesis a partir de los datos aportados por las agencias de información que hacen publicaciones periódicas de seguimiento, principalmente del *Survey of Energy Resources 2010* de WEC y el *Statistical review of world energy 2011* de BP. En realidad estos datos deberían de actualizarse tomando en consideración las publicaciones de 2013 de estas dos instituciones, pero no será esta la información a utilizar en la tesis, ya que como se ha indicado se optará por utilizar datos expresados en relación a un nivel de probabilidad determinado.

Se han completado las trayectorias históricas de producción de cada uno de los países estudiados, a partir de la información contenida en fuentes públicas. Después de 1965 los datos de referencia son los de *Statistical review of world energy* de BP, y para años anteriores se ha recurrido a fuentes de información nacionales e internacionales, pero siempre información publicada.

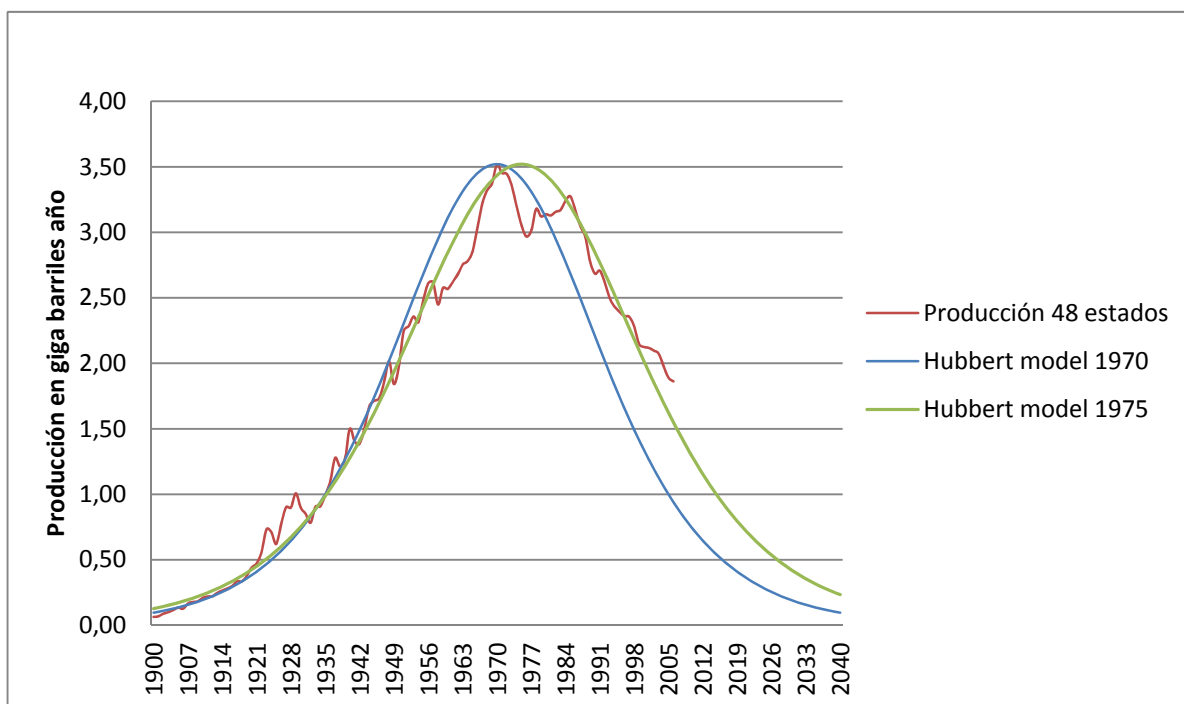


Figura 7.3: Extracción real de petróleo en Estados Unidos (48 estados) y representación a partir de la ecuación $P=2P_m/(1+\cosh(b(t-t_m)))$. Elaboración propia, datos (EPI 2014).

Tabla 7.2: Reservas probadas recuperables de combustibles fósiles. Elaboración propia, fuentes de datos (BP 2011; WEC 2010a).

		Reservas Oil+NGL			Reservas NoConv			Gas		Carbón		TOTAL
datos 2008		MTonnes	Mbarrils	Gb	Bitumen	Extra-Heavy	Total (Gb)	Gm3	Gbep	Mtoe	Gbep	Gbep
Russian Federation	BP	10.647	79.000	79	28367	6	28,373	44.900	282,870	76.431	557,949	948,192
United States of America	BP	3.429	28.396	28,396		19	0,019	7.022	44,239	118.731	866,733	939,386
China	BP	2.466	18.052	18,052	1	750	0,751	3.090	19,467	58.228	425,062	463,332
Iran	BP	17.329	137.610	137,61			0	29.610	186,543	734	5,356	329,509
Saudi Arabia	BP	34.518	264.063	264,063			0	7.569	47,685			311,748
India	BP	740	5.836	5,836			0	1.074	6,766	35.483	259,026	271,628
Australia	BP	255	2.335	2,335			0	819	5,160	34.032	248,433	255,928
Canada	BP	3.126	21.846	21,846	170400		170,4	1.754	11,050	3.138	22,907	226,204
Venezuela	BP	13.997	99.377	99,377		57854	57,854	4.983	31,393	292	2,133	190,757
Qatar	BP	3.094	25.405	25,405			0	25.172	158,584			183,989
United Arab Emirates	BP	12.555	97.800	97,8			0	6.432	40,522			138,322
Iraq	BP	15.478	115.000	115			0	3.170	19,971			134,971
South Africa	AF	2	15	0,015			0	10	0,063	18.393	134,269	134,347
Ukraine	EU	151	1.290	1,29			0	787	4,958	17.317	126,414	132,662
Kuwait	BP	13.679	101.500	101,5			0	1.780	11,214			112,714
Germany	EU	16	118	0,118			0	126	0,794	11.482	83,820	84,731
Kazakhstan	BP	2.907	22.762	22,762	42009		42,009	3000	18,900			83,671
Nigeria	BP	4.953	37.200	37,2	574		0,574	5.292	33,340	88	0,645	71,758
Libya	BP	5.712	44.271	44,271			0	1.540	9,702			53,973
Turkmenistan	BP	81	600	0,6			0	8.400	52,920			53,520
Algeria	BP	2.731	23.241	23,241			0	4.504	28,375	36	0,263	51,879
Indonesia	BP	497	3.750	3,75	422		0,422	3.186	20,072	2.535	18,509	42,753
Colombia	BP	226	1.668	1,668		30	0,03	124	0,781	4.053	29,584	32,063
Serbia	EU	10	74	0,074			0	48	0,302	3.937	28,737	29,113
Brazil	BP	1.088	8.053	8,053			0	245	1,544	2.037	14,870	24,467
Poland	EU	15	113	0,113			0	75	0,473	3.032	22,130	22,716
Norway	BP	920	7.491	7,491			0	2.215	13,955	2	0,016	21,462
Malaysia	BP	701	5.357	5,357			0	2.330	14,679	2	0,015	20,051
Mexico	BP	1.611	11.865	11,865		1	0,001	360	2,268	673	4,912	19,046
Egypt (Arab Rep.)	BP	561	4.200	4,2		50	0,05	2.170	13,671	10	0,073	17,994
Azerbaijan	BP	950	7.000	7		125	0,125	1.359	8,562			15,687
Uzbekistan	BP	70	594	0,594			0	1.745	10,994	550	4,015	15,602
Oman	BP	744	5.500	5,5			0	950	5,985			11,485
Angola	BP	1.282	9.500	9,5	465		0,465	161	1,014			10,979
Pakistan	AS	42	313	0,313			0	840	5,292	610	4,453	10,058
Mongolia	AS	2	15	0,015			0		0,000	1.093	7,982	7,997
Netherlands	EU	6	48	0,048			0	1.245	7,844			7,892
Sudan	BP	904	6.700	6,7			0	85	0,536			7,236

Bosnia-Herzegovina										962	7,023	7,023
Turkey	AS	44	172	0,172			0	6	0,038	933	6,811	7,021
Vietnam	BP	626	4.700	4,7			0	217	1,367	91	0,668	6,735
Argentina	BP	348	2.520	2,52			0	399	2,514	223	1,631	6,665
Ecuador	BP	909	6.511	6,511		42	0,042	9	0,057	7	0,051	6,661
Greece	EU	1	10	0,01			0	2	0,013	850	6,205	6,228
Yemen	BP	345	2.670	2,67			0	555	3,497			6,167
United Kingdom	BP	408	3.060	3,06		76	0,076	292	1,840	139	1,015	5,991
Thailand	BP	50	453	0,453			0	340	2,142	349	2,544	5,139
Bulgaria	EU	2	15	0,015			0	1	0,006	698	5,095	5,117
Bolivia	SA	54	465	0,465			0	710	4,473	1	0,007	4,945
Hungary	EU	5	40	0,04			0	67	0,422	544	3,971	4,433
Syria (Arab Rep.)	BP	335	2.459	2,459			0	300	1,890			4,349
Gabon	BP	504	3.684	3,684			0	29	0,183			3,867
Myanmar (Burma)	AS	7	50	0,05			0	590	3,717	1	0,009	3,776
Trinidad & Tobago	BP	80	606	0,606			0	481	3,030			3,636
Bangladesh	AS	3	28	0,028			0	344	2,167	179	1,305	3,500
Peru	BP	124	1.121	1,121		7	0,007	335	2,111	27	0,197	3,436
Brunei	BP	160	1.200	1,2			0	350	2,205			3,405
Rep. of Congo (Brazzaville)	BP	274	1.940	1,94		506	0,506	91	0,573			3,019
Papua New Guinea	OC	9	70	0,07			0	442	2,785			2,855
Czech Republic	EU	2	12	0,012			0	4	0,025	373	2,723	2,760
Equatorial Guinea	BP	231	1.705	1,705			0	120	0,756			2,461
Korea (Democra People Rep.)										317	2,314	2,314
Zimbabwe										306	2,235	2,235
Cameroon	AF	168	1.212	1,212			0	150	0,945			2,157
Spain	EU	20	150	0,15			0	3	0,019	264	1,931	2,100
New Zealand	OC	20	162	0,162			0	46	0,290	205	1,497	1,948
Japan	AS	9	68	0,068			0	51	0,321	210	1,533	1,922
Albania	EU	30	199	0,199		34	0,034	5	0,032	223	1,631	1,895
Armenia								164	1,033	99	0,726	1,759
Mozambique								127	0,800	129	0,944	1,744
Kyrgyzstan	AS	5	40	0,04			0	6	0,038	228	1,664	1,742
Tajikistan	AS	2	12	0,012			0	7	0,044	229	1,670	1,726
Philippines	AS	15	138	0,138			0	93	0,586	131	0,956	1,680
Romania	BP	55	411	0,411			0	102	0,643	85	0,623	1,676
Chad	BP	222	1.500	1,5			0		0,000			1,500
Denmark	BP	108	811	0,811			0	66	0,416			1,227
Italy	BP	62	434	0,434		210	0,3	70	0,441	4	0,029	1,204
Tunisia	BP	69	535	0,535			0	92	0,580			1,115
Laos										143	1,044	1,044
Tanzania								24	0,151	122	0,890	1,042

Georgia	AS	5	35	0,035	3		0,003	8	0,050	123	0,895	0,983
Chile	SA	4	30	0,03			0	46	0,290	69	0,506	0,825
Côte d'Ivoire	AF	64	471	0,471			0	42	0,265			0,736
Bahrain	ME	16	125	0,125			0	91	0,573			0,698
Macedonia										93	0,679	0,679
Slovakia	EU	1	9	0,009			0	15	0,095	74	0,543	0,646
Swaziland										88	0,642	0,642
Montenegro										87	0,635	0,635
Cuba	NA	19	124	0,124		48	0,048	71	0,447			0,619
Afghanistan								50	0,315	40	0,294	0,609
Congo (Democratic Rep.)	AF	25	180	0,18	30		0,03	1	0,006	54	0,392	0,608
Greenland										82	0,599	0,599
Slovenia										67	0,489	0,489
Taiwan, China								70	0,441	1	0,004	0,445
Korea (Republic)								3	0,019	56	0,409	0,428
Belarus	EU	27	198	0,198			0	3	0,019	28	0,205	0,422
Rwanda								57	0,359			0,359
Niger										43	0,314	0,314
Croatia	EU	10	73	0,073			0	36	0,227			0,300
Mauritania	AF	14	100	0,1			0	28	0,176			0,276
Madagascar					221		0,221	2	0,013			0,234
Botswana										24	0,175	0,175
Ghana	AF	2	15	0,015			0	24	0,151			0,166
Ethiopia								25	0,158			0,158
Israel								24	0,151			0,151
Austria	EU	7	50	0,05			0	16	0,101			0,151
France	EU	14	103	0,103			0	7	0,044			0,147
Ireland								10	0,063	9	0,066	0,129
Namibia								20	0,126			0,126
Jordan								15	0,095			0,095
Guatemala	NA	13	83	0,083			0		0,000			0,083
Portugal										11	0,080	0,080
Surinam	SA	12	80	0,08			0		0,000			0,080
Senegal								10	0,063			0,063
Zambia										6	0,045	0,045
Somalia								6	0,038			0,038
Benin	AF	1	8	0,008			0	1	0,006			0,014
Morocco								2	0,013			0,013
Lithuania	EU	2	12	0,012			0		0,000			0,012
Malawi										1	0,007	0,007
Belize	NA	1	7	0,007			0		0,000			0,007
Total		163.038	1.238.824	1.239	243.208	59.132	302,340	185.545	1.169	401.949	2.934	5.644,322

Algeria	tm	pm	u	b	CC		
H1	1971	500	6300	0,31746	0,97307		
H2	1985	600	18300	0,13115	Acumula	año 2010	
H3	2016	1900	98120	0,07746	62694	Curva	1809
	URR	122720			62673	Real	1885

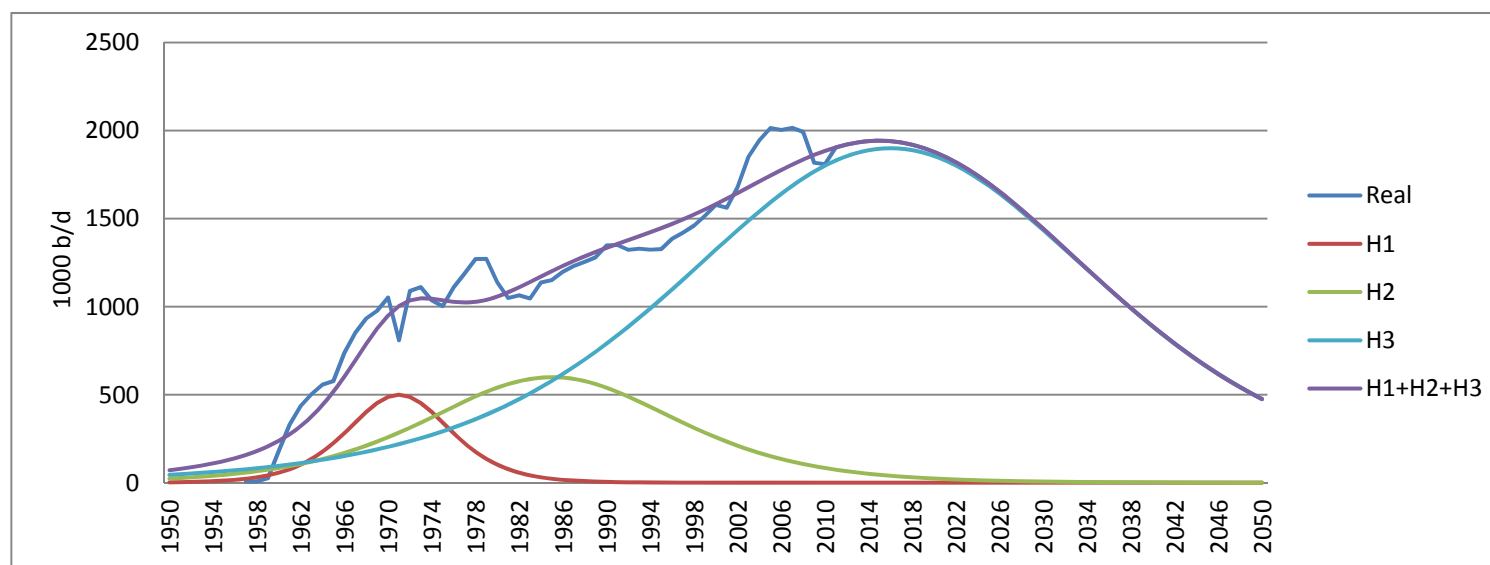


Figura 7.4: Modelización del proceso de agotamiento de petróleo convencional en Argelia, a partir de las ecuaciones de Hubbert y Laherrere. Elaboración propia, datos (BP 2011; WEC 2010a).

Con los datos indicados podemos representar la curva de extracción de EE.UU., en la Figura 7.3 se representa la producción real de los 48 estados, a partir de la ecuación de la curva de Hubbert trazamos la primera representación, *Hubbert model 1970*, considerando que la reservas totales estimadas son de 200 Gb de acuerdo al pronóstico de Hubbert, y utilizando el modelo de Laherrere, pm vale 3,5 Gb/año (de acuerdo a la máxima producción registrada) y tm es 1970, el año de máxima producción. Observamos que la curva representa bastante bien la etapa de crecimiento de la producción, pero se desvía en la etapa de caída, posiblemente se debe a desviaciones en las estimaciones de reservas, al efecto del alza de los precios sobre las reservas, y también al efecto de la mejora tecnológica. Para mejorar la representación en *Hubbert model 1975*, hemos incrementado el valor de las reservas U hasta 224 Gb, la pm 3,5 Gb y tm corresponde a 1975, obtenemos una curva que mejora la representación de la historia de producción, nos indica que pese a los esfuerzos la producción de petróleo convencional en EE.UU caerá a menos de 1Gb/año antes de 2020.

En la Figura 7.5 se ha utilizado la curva de Hubbert para representar la posible evolución del agotamiento del petróleo a escala global, en este caso no es posible representar la evolución mediante una única curva, principalmente por la anomalía que supone la recesión económica de la década de 1980. En este caso se recurre a una representación a partir de dos curvas superpuestas. Para la curva Hubbert 1, las reservas que abarcan la curva son de 140 Gb ($Uh1$), el año de máxima producción ($tmh1$) es el 1975 y la máxima producción ($pmh1$) es de 11 Gb, lo que da un factor $bh1$ de 0,314. Para la curva Hubbert 2, las reservas son de 2.252 Gb ($Uh2$), el año de máxima producción ($tmh2$) es el 2010 y la máxima producción ($pmh2$) es de 31,2 Gb, lo que da un factor $bh2$ de 0,055.

La suma de las dos curvas de Hubbert representa una evolución que se ajusta con bastante fiabilidad a la curva de la producción real en los años de referencia. Dado que la curva H1 ha dejado de tener efecto para cuando la curva H2 alcanza su valor máximo, se podría concluir que la máxima producción de petróleo sería de 31,2 Gb/año y se produciría en 2010, es decir ya habría pasado. En realidad los datos registrados de máxima producción son de 30,9 Gb y corresponden al año 2006, que es el año real del *peak-oil* del petróleo crudo convencional. La pendiente media de disminución de la producción entre 2010 y 2040 representada por la curva Hubbert 2, es de un 2,1% anual, un 0,8% entre 2010 y 2020, un 2,2% entre 2020 y 2030, y un 3,4% entre 2030 y 2040.

Pocos países tienen una curva de explotación del petróleo a lo largo de la historia tan regular como EE.UU., hasta el punto de poder ser representadas por una sola curva de Hubbert, por lo general los países han seguido trayectorias de extracción fuertemente condicionadas por acontecimientos políticos, conflictos y relaciones con socios internacionales. Para poder representar estas trayectorias irregulares se hace uso de la agregación de tres curvas como las anteriores, cada una de estas curvas se define a partir de tres valores: la producción máxima pm , el año tm de producción máxima y las reservas recuperables asignadas a esta curva U . Con los tres datos anteriores podemos definir una ecuación que nos asignará una producción a cada año del período representado. La decisión de usar tres curvas se debe a que es el mínimo número con el que podemos obtener resultados de correlación aceptables entre las series históricas reales y las calculadas. En algún caso particular tres series no son suficientes y se ha recurrido a un número mayor.

En la Figura 7.4 se ha representado el caso de Argelia, la evolución de la producción en este país se obtiene a partir del método anterior, que se completa con un procedimiento basado en tres condiciones o datos de comprobación. El primer dato es el total de las reservas recuperables URR estimadas, el volumen total de la producción contenida en la curva de producción debe de ser igual a estas reservas. El segundo dato es la trayectoria histórica de producción del país, el modelo propuesto debe de representar con la máxima precisión esta trayectoria histórica, la representación sería perfecta si esta la obtuviéramos a partir de infinitas curvas de modelización, pero en la práctica, como se ha indicado, limitaremos el número a tres curvas, por tanto

intentaremos maximizar la correlación entre la trayectoria histórica real y la calculada a partir del uso de estas tres curvas. El tercer elemento a considerar es la producción del último año de la trayectoria histórica, no siempre será posible que las producciones reales en este año y las que corresponden a la trayectoria simulada coincidan, esto en principio no debería de suponer un problema, salvo si pretendemos representar el proceso histórico con datos reales y el futuro con datos simulados, en ese caso en el año de paso de un sistema a otro se producirá una perturbación que solo sería evitada si las producciones en ese año correspondientes a los dos sistemas fueran iguales.

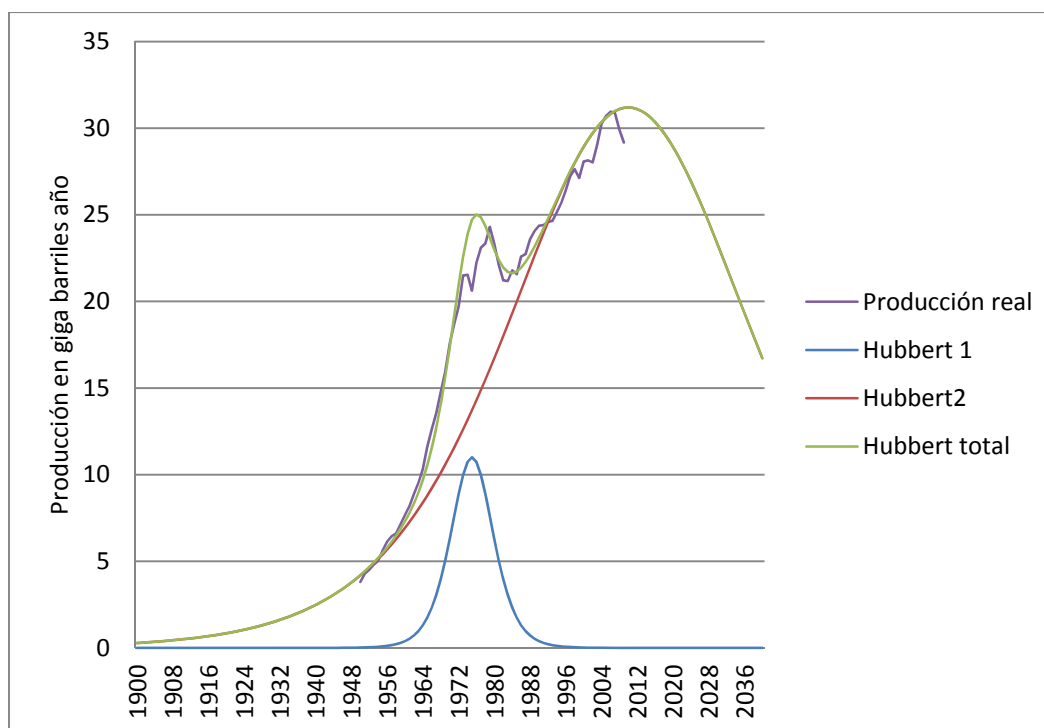


Figura 7.5: Extracción real de petróleo en el mundo y representación a partir de una doble curva de Hubbert, $P=2P_m/(1+\cosh(b(t-t_m)))$. Elaboración propia, datos (EPI 2014).

Las trayectorias históricas de cada país se han calculado entre 1880 y 2050, aunque en las gráficas no se representa todo el rango de datos. Estas trayectorias pueden ser agregadas a nivel regional o a nivel global, obteniendo las curvas de agotamiento correspondientes.

No corresponde a este apartado extraer conclusiones sobre el significado de esta evolución, o sobre las implicaciones que de ello se derivan. Tampoco discutimos aquí la fiabilidad de los datos aportados por el WEC, aunque si se reconoce que los datos propuestos por *Survey of Energy Resources* es una recopilación de los datos aportados por las principales agencias, centros de investigación y publicaciones referidas al petróleo. En los datos de referencia no han sido considerados los llamados petróleos no convencionales, ni los posibles descubrimientos en aguas profundas o en el ártico, ni tampoco los recursos procedentes de otras fuentes como los biocombustibles, o la licuefacción del carbón o el gas.

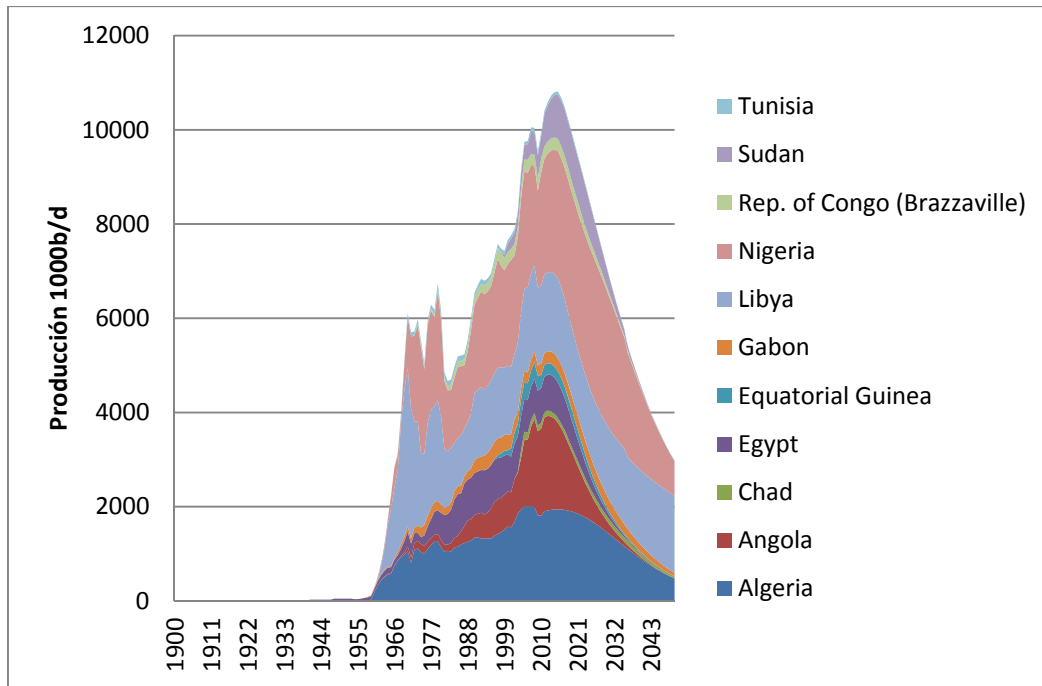


Figura 7.6: Producción agregada de petróleo convencional en África. Elaboración propia.

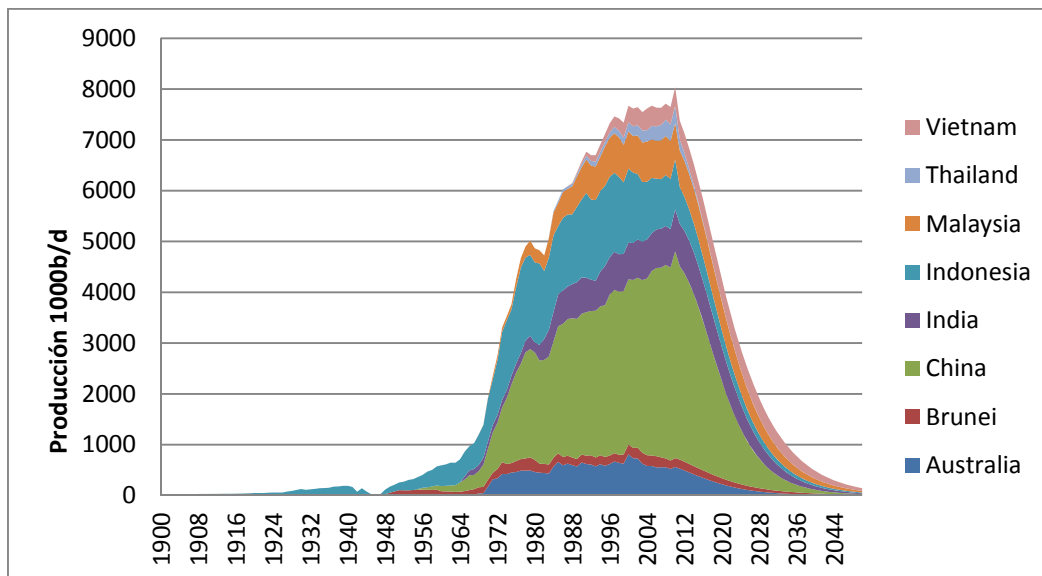


Figura 7.7: Producción agregada de petróleo convencional en Asia-pacífico. Elaboración propia.

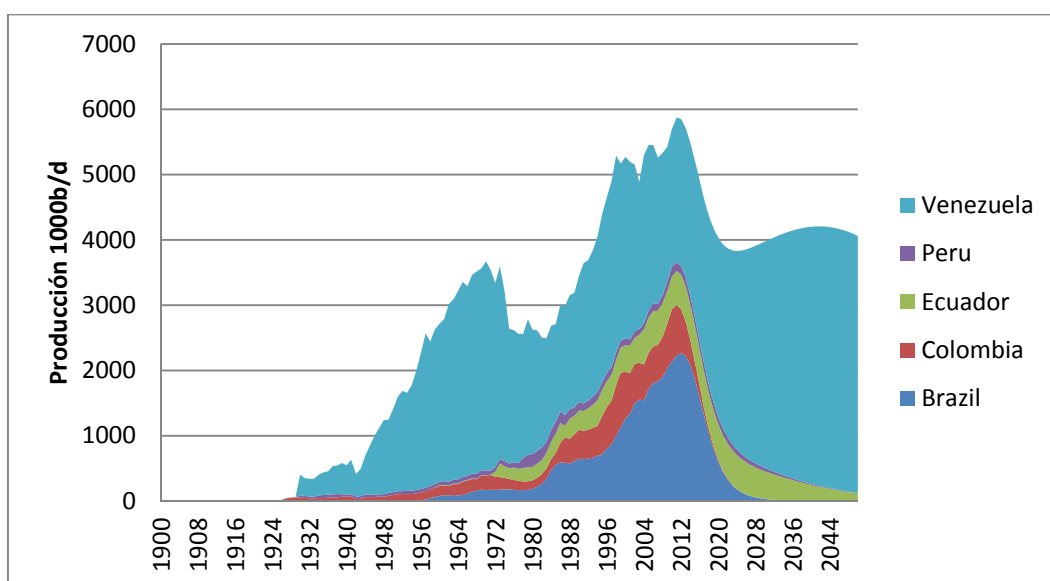


Figura 7.8: Producción agregada de petróleo convencional en Centro y Sudamérica. Elaboración propia.

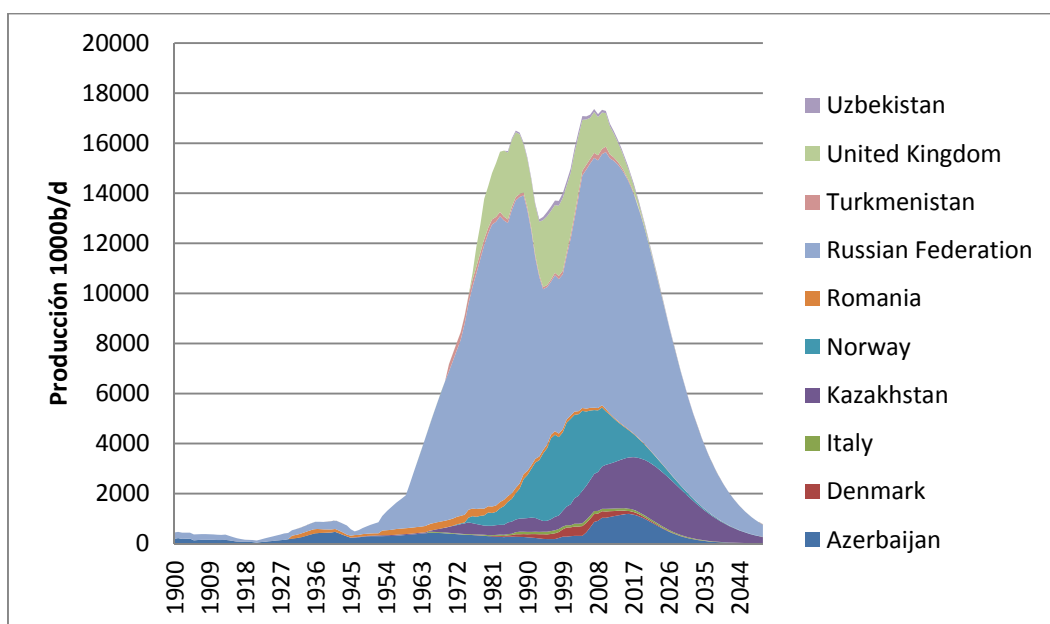


Figura 7.9: Producción agregada de petróleo convencional en Europa-Eurasia. Elaboración propia.

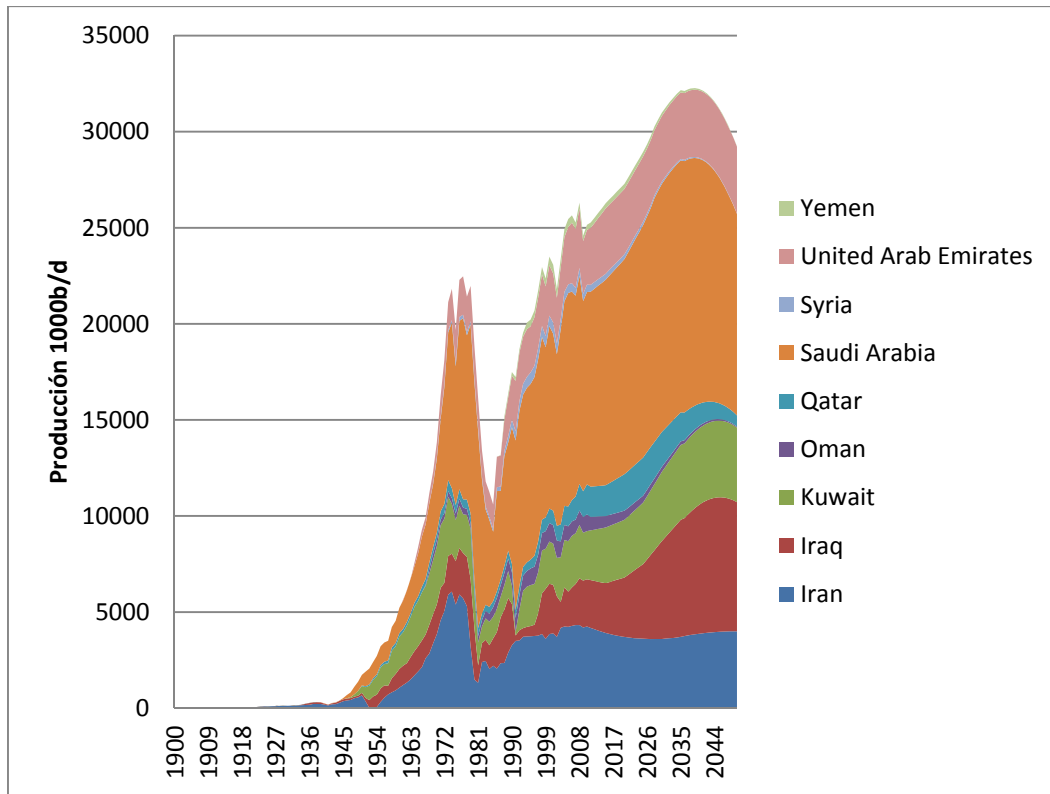


Figura 7.10: Producción agregada de petróleo convencional en Medio Oriente. Elaboración propia.

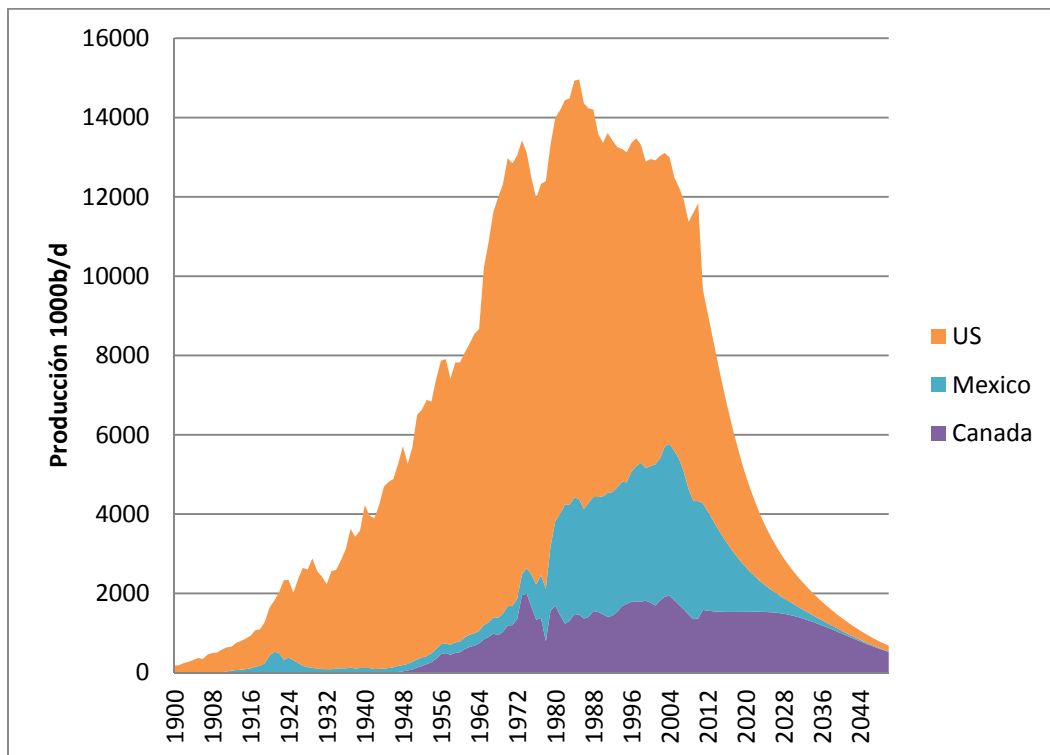


Figura 7.11: Producción agregada de petróleo convencional en Norteamérica. Elaboración propia.

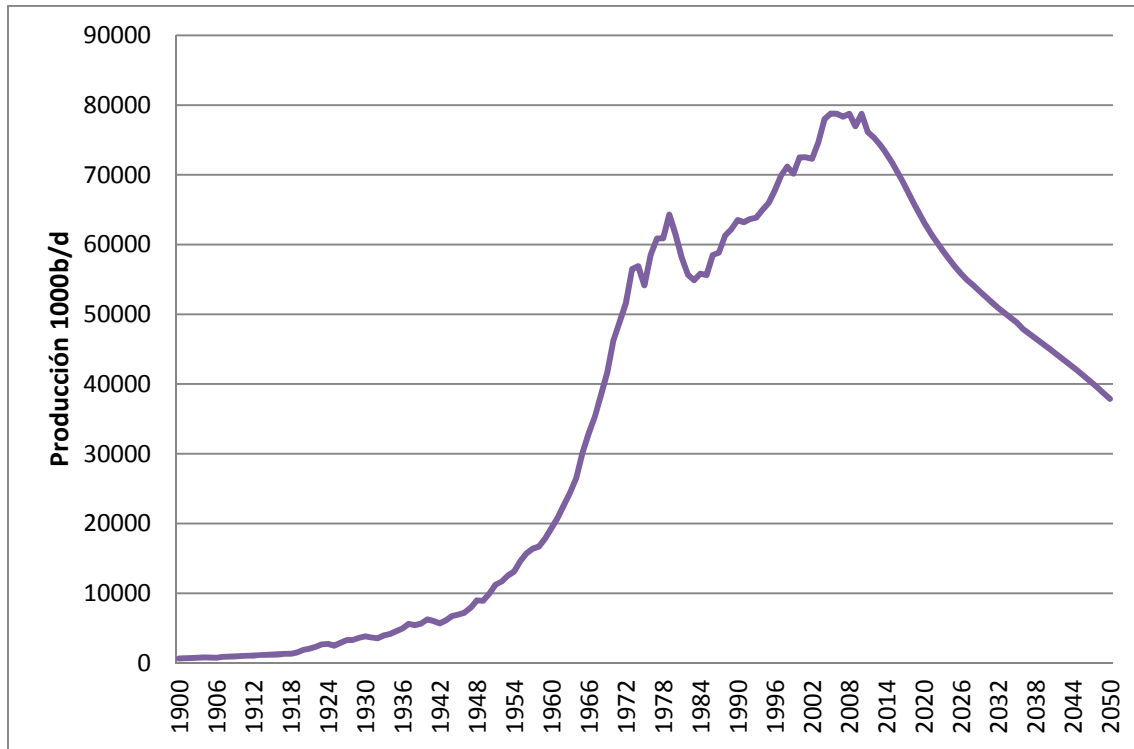


Figura 7.12: Producción agregada de petróleo convencional global. Elaboración propia.

8 PLAN DE TRABAJO

A pesar del exhaustivo trabajo realizado para representar el estado del arte en relación a la seguridad energética, la propuesta de tesis desarrollada se enfrenta a incertezas importantes en su realización:

- La formulación de los modelos de representación del sistema energético y su alcance, no pueden ser establecidos hasta que los modelos de evaluación integrada de referencia no sean estudiados. La determinación del soporte de programación en el que se desarrollará el modelo y la configuración del modelo es aún incierta.
- Existen dudas sobre cómo serán tratados conceptos básicos como el crecimiento de las reservas, las tasas de retorno energético, las tasas de agotamiento o los productos no convencionales.
- Aunque la principal fuente de información a nivel de reservas serán las evaluaciones de la *United States Geological Survey*, aún no ha sido posible reunir toda la información necesaria, por lo que hay incertezas abiertas en este sentido.
- La determinación de los escenarios energéticos de referencia, los escenarios económicos y de población, presentan también incertezas importantes.
- El alcance de la tesis en relación al estudio del mercado eléctrico y el desarrollo de metodologías para su evaluación es un tema aún por concretar.

Es por todo ello que la presente tesis supondrá navegar por aguas a nivel personal muy poco exploradas, sobre las que existe una ingente actividad científica, pero que han sido poco desarrolladas en los aspectos que se pretenden trabajar.

Si a eso se suma el volumen de docencia, la coordinación de asignaturas, el desarrollo de nuevos materiales y las actividades de gestión, que inevitablemente tendré que compaginar con la investigación propuesta, cabe imaginar que el calendario que se propone, no es más que una declaración de intenciones, una hoja de ruta para intentar navegar en un contexto incierto, en los contenidos y en la forma, en el corto plazo y en el largo. Sujeto a perturbaciones tipo *shock* y tipo *stress*, con causas tratables e intratables.

Ante ello solo cabe recurrir a la determinación por avanzar hacia los objetivos, intentando neutralizar las perturbaciones que sea posible, optimizando el uso de un tiempo escaso, concentrando esfuerzos en la tarea, y adaptándose a unas circunstancias cambiantes y por lo general hostiles, en relación al objetivo.

Actividades		2014						2015												2016					
		7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1.1	Analizar el tratamiento del petróleo y el gas en los modelos de evaluación integrada.																								
1.2	Estudiar conceptos básicos de referencia del petróleo y el gas.																								
1.3	Determinación de las reservas disponibles clasificadas en los diferentes países productores.																								
1.4	Construir las bases de un modelo que permita simular los procesos de agotamiento.																								
1.5	Dibujar escenarios de demanda por países.																								
1.6	Evaluar diferentes escenarios mediante los indicadores de soberanía, robustez y resiliencia.																								
1.7	Evaluar el volumen de población desabastecida en cada escenario y por países																								
1.8	Discutir los resultados.																								
2.1	Desarrollar estado del arte de los mercados eléctricos																								
2.2	Estudiar vulnerabilidades																								
2.3	Desarrollar propuesta metodológica para el análisis del mercado eléctrico en relación a la seguridad energética																								
3	Redactar documento tesis y publicaciones																								

9 BIBLIOGRAFIA

- APERC. 2007. *A Quest for Energy Security in the 21st Century*. Tokyo, Japan: Institute of Energy Economics, Asia Pacific Energy Research Centre (APERC).
http://aperc.iecej.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf.
- Bauer, Nico, Lavinia Baumstark, and Marian Leimbach. 2011. "The REMIND-R Model: The Role of Renewables in the Low-Carbon Transformation—first-Best vs. Second-Best Worlds." *Climatic Change* 114(1): 145–68. <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0129-2> (May 14, 2014).
- Bauer, Nico, Ottmar Edenhofer, and Socrates Kypreos. 2007. "Linking Energy System and Macroeconomic Growth Models." *Computational Management Science* 5(1-2): 95–117. <http://link.springer.com/10.1007/s10287-007-0042-3> (May 14, 2014).
- Berrah, Nouredine; Feng, Fei; Priddle, Roland; Wang, Leiping. 2007. *Sustainable Energy in China: The Closing Window of Opportunity*. Washington, DC: The World Bank.
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6625>.
- Blyth, William, and Nicolas Lefèvre. 2004. *Energy Security and Climate Change Policy Interactions*. Paris, France.
http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.iea.org/ContentPages/26172479.pdf.
- Bollen, Johannes. 2008. *Energy Security, Air Pollution, and Climate Change: An Integrated Cost-Benefit Approach*. Bilthoven, Netherlands.
<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/500116004.pdf>.
- Bosetti, Valentina, Enrica De Cian, Alessandra Sgobbi, and Massimo Tavoni. 2009. *Climate Change and Sustainable Development The 2008 WITCH Model New Model Features and Baseline*. Venezia, Italy.
<http://www.feem.it/getpage.aspx?id=2319&sez=Publications&padre=73>.
- Bosetti, Valentina, Emanuele Massetti, Massimo Tavoni, Nota D I Lavoro, Fondazione Eni, Enrico Mattei, and Università Cattolica. 2007. "The WITCH Model . Structure , Baseline , Solutions." *Climate Change and Sustainable Development* (I).
- BP. 2011. *BP Statistical Review of World Energy 2011*. BP Statist. British Petroleum.
<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013/statistical-review-1951-2011.html>.
- BP. 2013. *BP Statistical Review of World Energy 2013*. London UK.
<http://www.bp.com/statisticalreview>.
- Brzezinski, Zbigniew K. 1998. *The Grand Chessboard: American Primacy and Its Geostrategic Imperatives*. New York: Perseus Books Group.
- CEIP. 2004. *Study on Energy Supply Security and Geopolitics*. The Hague, the Netherlands.
<http://clingendael.info/ciep/publications/studies/?id=5706&&type=summary>.

- CERA. 2014. "Upstream Capital Costs Index (UCCI)." *IHS Indexes*.
<http://www.ihs.com/info/cera/ihsindexes/index.aspx> (April 28, 2014).
- Chang, Ha-Joon. 2007. *Institutional Change and Economic Development*. United Nat. Tokyo, Japan: United Nations University Press.
- Cherp, Aleh, Adeola Adenikinju, Andreas Goldthau, Francisco Hernandez, Larry Hughes, Jaap Jansen, Jessica Jewell, Marina Olshanskaya, Ricardo Soares de Oliveira, Benjamin Sovacool, and Sergey Vakulenko. 2012. "Energy and Security." In *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria., 325–83. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/about/news/Global-Energy-Assessment-now-available.en.html>.
- Cherp, Aleh, and Jessica Jewell. 2010. *Measuring Energy Security: From Universal Indicators to Contextualized Framework*. The Route. ed. Benjamin Sovacool. Routledge.
<http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=12683&postid=2270263>.
- Cherp, Aleh, and Jessica Jewell. 2011. "The Three Perspectives on Energy Security: Intellectual History, Disciplinary Roots and the Potential for Integration." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3(4): 202–12.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877343511000583> (February 25, 2014).
- Chester, Lynne. 2010. "Conceptualising Energy Security and Making Explicit Its Polysemic Nature." *Energy Policy* 38(2): 887–95.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421509007861> (January 24, 2014).
- Chevalier, Jean-marie. 2006. "Security of Energy Supply for the European Union." *European Review of Energy Markets* 1(3): 1–20.
- Commission, European. 1988. "The Internal Energy Market COM (88) 238." 90.
<http://aei.pitt.edu/4037/>.
- Commission, European. 1994. "For a European Union Energy Policy - Green Paper. COM (94) 659 Final." 128. http://aei.pitt.edu/1185/1/energy_gp_COM_94_659.pdf.
- Commission, European. 2001. "Libro Verde: Hacia Una Estrategia Europea de Seguridad Del Abastecimiento Energético." 114.
- Commission, European. 2006. "Green Paper. A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy." 20.
http://ec.europa.eu/energy/strategies/2006/2006_03_green_paper_energy_en.htm.
- Commission, European. 2007. "An Energy Policy for Europe. COM(2007) 1 Final. Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament." 28. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52007DC0001>.
- Cooke, Henrietta, Ilkka Keppo, and Steven Wolf. 2013. "Diversity in Theory and Practice: A Review with Application to the Evolution of Renewable Energy Generation in the UK." *Energy Policy* 61: 88–95. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030142151300596X> (May 14, 2014).

- Coriat, Benjamin, and Olivier Weinstein. 2005. "The Social Construction of Markets." *Issues in Regulation Theory*: 4.
- Doukas, Haris, Alexandra Papadopoulou, Nikolaos Savvakis, Theocharis Tsoutsos, and John Psarras. 2012. "Assessing Energy Sustainability of Rural Communities Using Principal Component Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(4): 1949–57. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112000196> (April 3, 2014).
- EIA. 2012. "World Oil Transit Chokepoints." <http://www.eia.gov/countries/regions-topics.cfm?fips=wotc&trk=p3> (April 30, 2014).
- EIA. 2014. "Spot Prices for Crude Oil and Petroleum Products." *PETROLEUM & OTHER LIQUIDS*. http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_m.htm (April 28, 2014).
- EPI. 2014. "The Earth Policy Institute (EPI)." *World Oil Production, 1950-2007, with Projections to 2020 (XLS)*. http://www.earth-policy.org/about_epi/ (June 12, 2014).
- ETSAP. 2011. "TIMES Integrated Assessment Model." *ETSAP contracting parties*. http://www.iea-etsap.org/web/etsap_tiam/.
- European, Commission. 1990. *Working Paper of the Commission on Security of Supply, the Internal Energy Market and Energy Policy*. SEC (90) 1248 final. <http://aei.pitt.edu/3687/>.
- FEEM. 2010. "WITCH (World Induced Technical Change Hybrid Model)." *Climate Change and Sustainable Development*. <http://www.witchmodel.org/> (June 13, 2014).
- GCAM. 2012. "Global Change Assessment Model (GCAM)." http://wiki.umd.edu/gcam/index.php/Main_Page (May 13, 2014).
- GEA. 2012. *Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future*. eds. Thomas B. Johansson, Nebojsa Nakicenovic, Anand Patwardhan, and Luis Gomez-Echeverri. Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press. <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511793677>.
- Gnansounou, Edgard. 2008. "Assessing the Energy Vulnerability: Case of Industrialised Countries." *Energy Policy* 36(10): 3734–44. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508003510> (March 19, 2014).
- De Groeve, Tom, Karmen Poljanšek, and Luca Vernaccini. 2014. *Index for Risk Management: InfoRM - Concept and Methodology*. European C. <http://preventionweb.net/go/36977>.
- Gupta, Eshita. 2008. "Oil Vulnerability Index of Oil-Importing Countries." *Energy Policy* 36(3): 1195–1211. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507005022> (February 3, 2014).
- Hainoun, a., M. Seif Aldin, and S. Almoustafa. 2010. "Formulating an Optimal Long-Term Energy Supply Strategy for Syria Using MESSAGE Model." *Energy Policy* 38(4): 1701–14. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421509008817> (May 7, 2014).

- Hirsch, Robert, Roger Bezdek, and Robert Wendling. 2005. *Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation and Risk Management*. Nova Scien. eds. U.S.Department of Energy and National Energy Technology Laboratory. http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/oil_peaking_netl.pdf.
- Hoogeveen, Femke, and Wilbur Perlot. 2005. *Tomorrow's Mores. The International System , Geopolitical Changes and Energy*. The Hague, The Netherlands. <http://clingendael.info/ciep/publications/?id=6089&&type=summary>.
- Hubbert, King. 1956. "Nuclear Energy and the Fossil Fuels." *American Petroleum Institute. Drilling and production practices* N° 95: 7 – 25.
- Hubbert, King. 1980. "Techniques of Prediction as Applied to the Production of Oil and Gas." *NBS Special Publication* 631: 16–141.
- IAEA. 2005. *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. Vienna, Austria: IAEA Library Cataloguing in Publication Data. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222_web.pdf.
- IAEA. 2008. *Financing of New Nuclear Power Plants*. Vienna, Austria: IAEA Library Cataloguing in Publication Data. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1345_web.pdf.
- IAEA. 2012. *IAEA Annual Report for 2012*. Vienna, Austria: IAEA Library Cataloguing in Publication Data. <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012/>.
- IAEA. 2013. *Nuclear Power Reactors in the World 2013*. Vienna, Austria: IAEA Library Cataloguing in Publication Data.
- IEA. 1985. *Energy Technology Policy*. ed. OECD Publications and Information Center. Washington.
- IEA. 2007. *Energy Security and Climate Policy - Assessing Interactions*. Paris, France: International Energy Agency.
- IEA. 2011. *Measuring Short-Term Energy Security*. Paris, France: International Energy Agency. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Moses.pdf>.
- IEA. 2013. *World Energy Outlook 2013*. OECD/IEA. Paris, France: International Energy Agency. <http://www.worldenergyoutlook.org/>.
- IEA. 2014. "IEA Statistics Search." <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/> (May 5, 2014).
- IIASA. 2014. "MESSAGE. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact ." <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/modelsData/MESSAGE/MESSAGE.en.html> (May 13, 2014).
- IPCC. 2000. *Emissions Scenarios. IPCC Special Report*. Intergover. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.

- IPCC. 2014. "Integrated Assessment Models." *Working Group III: Mitigation*.
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=311> (May 12, 2014).
- Jansen, J C, W G Van Arkel, and M G Boots. 2004. *Designing Indicators of Long-Term Energy Supply Security*. Energy research Centre of the Netherlands ECN.
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04007.pdf>.
- Jewell, Jessica. 2011. "The IEA Model of Short-Term Energy Security (MOSES)." 48. Paris, France: International Energy Agency (IEA).
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,20557,en.html>.
- Jewell, Jessica. 2013. "Energy Security and Climate Change Mitigation: The Interaction in Long-Term Global Scenarios." Center for Climate Change and Sustainable Energy Policy (3CSEP). <http://envsci.ceu.hu/node/19437>.
- Jewell, Jessica, Aleh Cherp, and Keywan Riahi. 2014a. "Energy Security under de-Carbonization Scenarios: An Assessment Framework and Evaluation under Different Technology and Policy Choices." *Energy Policy* 65: 743–60.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513010744> (January 23, 2014).
- Jewell, Jessica. 2014b. "Erratum to 'Energy Security under de-Carbonization Scenarios: An Assessment Framework and Evaluation under Different Technology and Policy Choices' [Energy Policy 65 (2014) 743–760]." *Energy Policy*: 1.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514000718> (March 5, 2014).
- Jimmy Carter. 1980. "The State of the Union Address Delivered Before a Joint Session of the Congress. January 23, 1980." *The American Presidency Project*.
<http://www.presidency.ucsb.edu/ws/index.php?pid=33079#axzz1KTFpFIXZ> (June 3, 2014).
- Keppeler, Jan Horst. 2007. *International Relations and Security of Energy Supply: Risk to Continuity and Geopolitical Risk*.
http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/dv/studykeppel/studykeppeler.pdf.
- Keppo, Ilkka, and Bob Zwaan. 2011. "The Impact of Uncertainty in Climate Targets and CO₂ Storage Availability on Long-Term Emissions Abatement." *Environmental Modeling & Assessment* 17(1-2): 177–91. <http://link.springer.com/10.1007/s10666-011-9283-1> (May 14, 2014).
- Klaassen, Ger, and Keywan Riahi. 2007. "Internalizing Externalities of Electricity Generation: An Analysis with MESSAGE-MACRO." *Energy Policy* 35(2): 815–27.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421506001236> (May 13, 2014).
- Kruyt, Bert, D.P. van Vuuren, H.J.M. de Vries, and H. Groenenberg. 2009. "Indicators for Energy Security." *Energy Policy* 37(6): 2166–81.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421509000883> (January 27, 2014).
- Laherrere, Jean. 1997. "Multi-Hubbert Modeling." *The Coming Global Oil Crisis*.
<http://www.oilcrisis.com/laherrere/multihub.htm> (May 29, 2014).

- Leimbach, Marian, Nico Bauer, Lavinia Baumstark, and Ottmar Edenhofer. 2009. "Mitigation Costs in a Globalized World: Climate Policy Analysis with REMIND-R." *Environmental Modeling & Assessment* 15(3): 155–73. <http://link.springer.com/10.1007/s10666-009-9204-8> (May 14, 2014).
- LIMITS. 2014. "Low Climate Impact Scenarios and the Implications of Required Tight Emission Control Strategies." <http://www.feem-project.net/limits/index.html>.
- Loulou, Richard. 2007. "ETSAP-TIAM: The TIMES Integrated Assessment Model. Part II: Mathematical Formulation." *Computational Management Science* 5(1-2): 41–66. <http://link.springer.com/10.1007/s10287-007-0045-0> (May 7, 2014).
- Loulou, Richard, and Maryse Labriet. 2007. "ETSAP-TIAM: The TIMES Integrated Assessment Model Part I: Model Structure." *Computational Management Science* 5(1-2): 7–40. <http://link.springer.com/10.1007/s10287-007-0046-z> (May 7, 2014).
- LR Raymond, CP Deming, MW Nichols. 2007. "Facing the Hard Truths About Energy." *National Petroleum Council* (July). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Facing+The+Hard+Truths+About+Energy#0> (March 10, 2014).
- Luderer, Gunnar, Marian Leimbach, Nico Bauer, Elmar Kriegler, Tino Aboumahboub, Arroyo Curras, Lavinia Baumstark, Christoph Bertram, Anastasis Giannousakis, Jérôme Hilaire, David Klein, Ioanna Mouratiadou, Robert Pietzcker, Franziska Piontek, Niklas Roming, Valeria Jana Schwanitz, and Jessica Strefler. 2013. "Description of the REMIND Model (Version 1.5)." 33. <http://www.pik-potsdam.de/research/sustainable-solutions/models/remind/> (May 14, 2014).
- Luderer, Gunnar, Robert C. Pietzcker, Elmar Kriegler, Markus Haller, and Nico Bauer. 2012. "Asia's Role in Mitigating Climate Change: A Technology and Sector Specific Analysis with ReMIND-R." *Energy Economics* 34: S378–S390. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988312001661> (May 14, 2014).
- Martchamadol, Jutamanee, and S. Kumar. 2013. "An Aggregated Energy Security Performance Indicator." *Applied Energy* 103: 653–70. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912007337> (January 24, 2014).
- Matthew H. Brown, Christie Rewey, Troy Gagliano. 2003. 80230 *Energy Security*. National C. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Energy+Security#2> (March 10, 2014).
- Mcgowan, Francis. 2008. "Can the European Union's Market Liberalism Ensure Energy Security in a Time of 'Economic Nationalism'?" 4(2): 90–106.
- Messner, Sabine, and Leo Schrattenholzer. 2000. "MESSAGE-MACRO: Linking an Energy Supply Model with a Macroeconomic Module and Solving It Iteratively." *Energy* 25(3): 267–82. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544299000638>.
- MNP. 2006. *Integrated Modelling of Global Environmental Change. An Overview of IMAGE 2.4*. Netherland. eds. A.F. Bouwman, T. Kram, and K. Klein Goldewijk. Bilthoven. <http://www.pbl.nl/en/publications/2006/Integratedmodellingofglobalenvironmentalchange.AnoverviewofIMAGE2.4>.

- Morriss, Andrew P, and Roger E Meiners. 2013. *Competition in Global Oil Markets: A Meta-Analysis and Review*. Washington. <http://www.secureenergy.org/policy/competition-global-oil-markets-meta-analysis-and-review>.
- Murakami, Tomoko, Mitsura Motokura, and Ichiro Kutani. 2011. *An Analysis of Major Countries Energy Security Policies and Conditions: Quantitative Assessment of Energy Security Policies*. http://www.hanyang.ac.kr/home_news/H5EAAQ/0010/101/2011/03/energy_security_policies_and_conditions_IEEJ.pdf.
- NEA/IAEA. 2012. *Uranium 2011 : Resources , Production and Demand*. OECD/NEA P. Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency.
- Noël, Pierre. 2008. “Is Energy Security a Political, Military or Market Problem?” *Financial Times*. <http://www.ft.com/intl/cms/s/2/fd6ef84a-bf85-11dc-8052-0000779fd2ac.html#axzz2wuC3s2yU>.
- Penchansky, Roy, and J. William Thomas. 1981. “The Concept of Access: Definition and Relationship to Consumer Satisfaction.” *Medical Care* 19(2): 13. <http://www.jstor.org/stable/i290364>.
- PRSG. 2014. “Political Risk Services.” *International Country Risk Guide (ICRG)*: 17. <https://www.prsgroup.com/about-us/our-two-methodologies/icrg> (June 12, 2014).
- Riahi, Keywan, Frank Dentener, Dolf Gielen, Arnulf Grubler, Jessica Jewell, Zbigniew Klimont, Volker Krey, David McCollum, Shonali Pachauri, Shilpa Rao, Bas van Ruijven, Detlef P. van Vuuren, and Charlie Wilson. 2012. “Chapter 17 - Energy Pathways for Sustainable Development.” In *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp., 1203–1306. <http://www.globalenergyassessment.org/>.
- Riahi, Keywan, Arnulf Grubler, and Nebojsa Nakicenovic. 2007. “Scenarios of Long-Term Socio-Economic and Environmental Development under Climate Stabilization.” *Technological Forecasting and Social Change* 74(7): 887–935. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162506001387> (April 1, 2014).
- Sacchetti, Dana. 2008. “Generation Next.” *IAEA Bulletin* 42(March): 64–65. <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull492/49204216465.pdf>.
- SAFE. 2013. *A National Strategy for Energy Security – Harnessing American Resources and Innovation*. Washington: Securing America’s Future Energy (SAFE). <http://www.secureenergy.org/policy/national-strategy-energy-security-2013>.
- SAFE. 2014. *Oil Security 2025 US National Security Policy in an Era of Domestic Oil Abundance*. Washington: Securing America’s Future Energy (SAFE). <http://www.secureenergy.org/projects>.
- Scheepers, Martin, Ad Seebregts, Jacques de Jong, and Hans Maters. 2007. *EU Standards for Energy Security of Supply*. ECN/Clinge. The Hague, The Netherlands. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/c06039.pdf>.

- Shrestha, RM., and S. Kumar. 2010. *Energy Security in Developing Countries*. Roskilde, Denmark: Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD). <http://www.gnesd.org/PUBLICATIONS/Energy-Security-Theme>.
- Sovacool, Benjamin K, and Marilyn A Brown. 2010. "Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective." *Annual Review of Environment and Resources* 35(1): 77–108.
- Stirling, Andy. 2009. "From Sustainability, through Diversity to Transformation: Towards More Reflexive Governance of Vulnerability." In *Vulnerability in Technological Cultures. New Directions in Research and Governance*, ed. and W. Bijker Chapter in A. Hommels, J. Mesman, , 408. <http://mitpress.mit.edu/books/vulnerability-technological-cultures>.
- The World Bank. 2014. "Infrastructure." *Enterprise Surveys*. <http://www.enterprisesurveys.org/Data/ExploreTopics/infrastructure> (May 26, 2014).
- UKERC. 2009a. "Global Oil Depletion: An Assessment of the Evidence for a near-Term Peak in Global Oil Production." *The Global Oil Depletion Report*: 929. <http://www.ukerc.ac.uk/support/Global+Oil+Depletion> (May 26, 2014).
- UKERC. 2009b. "Technical Report 6: Methods of Forecasting Future Oil Supply." In *UKERC Review of Evidence for Global Oil Depletion*, London, 97. <http://www.ukerc.ac.uk/support/Global+Oil+Depletion>.
- UN. 1987. *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development*. New York. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- UN. 1995. "Report of the World Summit for Development." *Report of the World Summit for social development*. <http://www.un.org/documents/ga/conf166/aconf166-9.htm> (June 3, 2014).
- Union, European. 1997. "Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council of 19 December 1996 Concerning Common Rules for the Internal Market in Electricity." *Official Journal of the European Communities*: 21–29. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31996L0092> (May 21, 2014).
- UNISDR. 2009. *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>.
- USGS. 2014. "World Petroleum Assessment and National Oil & Gas Assessment." *Energy Resources Program*. <http://energy.usgs.gov/OilGas/AssessmentsData/WorldPetroleumAssessment.aspx> (May 26, 2014).
- Vithayasrichareon, Peerapat, Iain F. MacGill, and Thanawat Nakawiro. 2012. "Assessing the Sustainability Challenges for Electricity Industries in ASEAN Newly Industrialising Countries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(4): 2217–33. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112000202> (April 4, 2014).
- WB. 2014. "Population (Total)." *Indicators*. <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL> (June 5, 2014).

- WEC. 2009. *World Energy and Climate Policy: 2009 Assessment*. London, United Kingdom: World Energy Council. http://www.worldenergy.org/documents/aepp_es_v24_print.pdf.
- WEC. 2010a. *2010 Survey of Energy Resources*. London, United Kingdom: World Energy Council. <http://www.worldenergy.org/publications/2010/survey-of-energy-resources-2010/>.
- WEC. 2010b. *Pursuing Sustainability: 2010 Assessment of Country Energy and Climate Policy*. London, United Kingdom: World Energy Council. http://www.worldenergy.org/documents/assessment_2010_full_report_1.pdf.
- WEC. 2013. *World Energy Resources 2013*. London, United Kingdom: World Energy Council. <http://www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-resources-2013-survey/>.
- WEF. 2006. *The New Energy Security Paradigm*. New York: Economic Forum and Cambridge Energy Research Associates. <http://www.weforum.org/pdf/Energy.pdf>.
- White, Rebecca, and Andrew Stirling. 2013. "Sustaining Trajectories towards Sustainability: Dynamics and Diversity in UK Communal Growing Activities." *Global Environmental Change* 23(5): 838–46. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378013001039> (February 20, 2014).
- Winzer, Christian. 2012. "Conceptualizing Energy Security." *Energy Policy* 46: 36–48. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512002029> (February 19, 2014).
- Wyszewianski, Leon. 2002. "Access to Care: Remembering Old Lessons." *Health Services Research* 37(6): 1441–43. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1464050/>.
- Zhang, Hai-Ying, Qiang Ji, and Ying Fan. 2013. "An Evaluation Framework for Oil Import Security Based on the Supply Chain with a Case Study Focused on China." *Energy Economics* 38: 87–95. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988313000637> (April 30, 2014).
- Zhang, Shuwei, Nico Bauer, Gunnar Luderer, and Elmar Kriegler. 2014. "Role of Technologies in Energy-Related CO₂ Mitigation in China within a Climate-Protection World: A Scenarios Analysis Using REMIND." *Applied Energy* 115: 445–55. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913008611> (May 14, 2014).
- Zhang, ZhongXiang. 2011. "China's Energy Security, the Malacca Dilemma and Responses." *Energy Policy* 39(12): 7612–15. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421511007221> (April 30, 2014).