

COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS UTILIZANDO EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Informe especial del Consejo Mundial de la Energía

Julio 2004

Traducción al español de
Comparison of Energy Systems
Using Life Cycle Assessment
COMITÉ ARGENTINO
CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGÍA

Directivos del Consejo Mundial de la Energía

Antonio del Rosario <i>Presidente del Consejo Mundial de la Energía</i>	Norberto de Franco Medeiros <i>Presidente del Comité de Programa</i>
Philip Aiken <i>Vicepresidente Sydney 2004</i>	Shige-etsu Miyahara <i>Vicepresidente Asia</i>
François Ailleret <i>Presidente del Comité de Estudios</i>	Kieran O'Brien <i>Vicepresidente Europa</i>
Asger Bundgaard-Jensen <i>Vicepresidente de Finanzas</i>	Fred Phaswana <i>Vicepresidente África</i>
John Derrick <i>Vicepresidente América del Norte</i>	Carlos Pierro <i>Vicepresidente América Latina y Caribe</i>
Alioune Fall <i>Vicepresidente Iniciativa GEIS</i>	Gerald Doucet <i>Secretario General</i>

Comités Miembros del Consejo Mundial de la Energía

Alemania	Filipinas	Níger
Angola	Finlandia	Nigeria
Arabia Saudita	Francia	Noruega
Argelia	Gabón	Nueva Zelanda
Argentina	Georgia	Países Bajos
Australia	Ghana	Pakistán
Austria	Grecia	Paraguay
Bangladesh	Hong Kong, China	Perú
Bélgica	Hungría	Polonia
Bielorrusia	India	Portugal
Bolivia	Indonesia	Reino Unido
Botswana	Irán (Rep. Islámica)	República Checa
Brasil	Irlanda	Rumania
Bulgaria	Islandia	Senegal
Camerún	Israel	Serbia & Montenegro
Canadá	Italia	Singapur
China (RP)	Japón	Siria (Rep. Árabe.)
Congo (Rep. Dem.)	Jordania	Sri Lanka
Corea (Rep.)	Kenya	Sudáfrica
Costa de Marfil	Latvia	Suecia
Croacia	Líbano	Suiza
Dinamarca	Libia/GSPLAJ	Swazilandia
Ecuador	Lituania	Tailandia
Egipto (Rep. Árabe)	Luxemburgo	Taiwán, China
El Salvador	Macedonia (Rep)	Tanzania
Eslovaquia	Mali	Trinidad & Tobago
Eslovenia	Marruecos	Túnez
España	México	Turquía
Estados Unidos	Mónaco	Ucrania
Estonia	Mongolia	Uruguay
Etiopía	Namibia	Venezuela
Federación Rusa	Nepal	Yemen

TABLA DE CONTENIDOS

LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	4
PRÓLOGO.....	5
RESUMEN EJECUTIVO	6
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	18
3. EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA	20
3.1. Definición y Alcance del Objetivo	21
3.2. Análisis de Inventario	22
3.3. Evaluación del Impacto.....	23
3.4. Interpretación	26
4. COMPARIACIÓN DE ALTERNATIVAS UTILIZANDO LA INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA	27
4.1. Beneficios de la realización de una ECV	27
4.2. Limitaciones de la realización de una ECV	28
4.3. ECV y Costo del Ciclo de Vida	28
4.4. Usos de los datos de ECV	29
4.5. Aspectos de la ECV y Etapas de la Generación de Electricidad.....	30
5. ANTECEDENTES PARA LOS ESTUDIOS SOBRE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE	33
5.1. Historia de la Energía Eléctrica y el Transporte.....	33
5.2. Cooperación Internacional para Controlar las Emisiones	34
5.3. Materia Particulada	36
5.4. Emisiones de sustancias radiactivas e impactos radiológicos	37
6. EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA	41
6.1. Evaluación Comparativa de Fuentes Alternativas de Energía.....	41
6.2. Electricidad proveniente de ciclos de combustión de combustibles fósiles.....	44
6.3. Electricidad proveniente de ciclos de renovables y energía nuclear	47
6.4. Ciclos de producción combinada de calor y electricidad	52
6.5. Calefacción urbana	56
6.6. Transporte	58
6.7. Otros efectos	63
7. OBSERVACIONES DE VARIAS FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA.....	67
7.1. Electricidad	68
7.2. Categorías de impacto.....	70
7.3. Emisiones de la combustión	71
8. CONCLUSIONES	72
8.1. Resultados.....	72
8.2. Uso del método	73
8.3. Algunas áreas posibles para futura investigación	76
ANEXO A: MIEMBROS DEL GRUPO DE ESTUDIO Y EXPERTOS INVITADOS.....	77

LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AFBC	Combustión de lecho fluido atmosférico
APA	Agencia de Protección Ambiental
BWR	Reactor de agua en ebullición
CCGI	Ciclo combinado con gasificación integrada
CCV	Costo del ciclo de vida
CFB	Lecho fluido circulante
CL	Concentración letal
CLFP	Combustión en lecho fluido a presión
COV	Compuesto orgánico volátil
DPA	Declaración de Producto Ambiental
ECV	Evaluación del Ciclo de Vida
EICV	Evaluación del impacto del ciclo de vida
FGD	Desulfuración de los gases de combustión
FV	Fotovoltaica
GLP	Gas licuado de petróleo
ICRP	Comisión Internacional sobre Protección Radiológica
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MP	Materia particulada
NGL	Líquidos de gas natural
NMVOG	Compuestos orgánicos volátiles no metánicos
PAFC	Celda de combustible de ácido fosfórico
PCCE	Producción combinada de calor y electricidad
PEFC	Celda de combustible de electrolito a base polímero
PFBG	Gasificación en lecho fluidizado presurizado
PWR	Reactor de agua a presión
SCR	Reducción catalítica selectiva
SOFC	Celda de combustible de óxido sólido
UNPEDE	Unión Internacional de Productores y Distribuidores de Energía Eléctrica
UNSCEAR	Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Ionizantes
VTT	Centro de Investigación Técnica (Finlandia)

PRÓLOGO

A menudo hay temas que son sujeto de estudios cuyos resultados pueden ser diferentes de los esperados o incluso contradictorios. Tal fue el caso hace unos años de la cuestión de la influencia de los campos electromagnéticos. Después de casi 1.000 estudios sobre el mismo tema, la contribución de la UNIPEDE (Unión Internacional de Productores y Distribuidores de Energía Eléctrica) no fue sumar el estudio número 1.001, sino realizar una revisión de los estudios existentes. La utilidad de dicho trabajo es innegable.

El Consejo Mundial de la Energía (CME) adoptó un enfoque comparable para la evaluación del ciclo de vida (ECV). El CME decidió incluir la evaluación de ciclo de vida de varias formas de producción de energía en su Programa de Estudios 2002-2004; el objetivo era identificar los estudios existentes sobre ECV, analizarlos y preparar un informe de recopilación de fácil comprensión. El objetivo del trabajo no era comparar los costos totales (incluyendo todas las externalidades identificadas) porque la ECV tiene un alcance más limitado que la evaluación de impacto ambiental.

Se analizan los tres objetivos del CME de accesibilidad de la energía (relacionado con los costos directos de la energía), la disponibilidad de energía (relacionado con la dimensión de la seguridad/fiabilidad) y aceptabilidad de la energía (externalidades ambientales), pero en general, los estudios existentes sobre la ECV sólo abarcan un subconjunto de todos los impactos posibles. A menudo la ECV se refiere a la comparación entre diferentes energías y usos, pero el estudio también se basa en trabajos dedicados a una única forma de energía y los incluye en la compilación total, aunque la comparación con otros estudios pueda perder algo de su pertinencia.

Este informe especial toma en cuenta la totalidad de la cadena de producción de energía desde exploración y extracción hasta procesamiento, almacenamiento, transporte, transformación en combustibles secundarios y uso final. De ahí que el informe considere cada energía primaria según su punto de origen y su uso final. Proporciona a los miembros del CME y a la comunidad internacional una comparación de las diferentes energías basada en las evaluaciones de ciclo de vida completo que han sido realizadas en los últimos 10-15 años.

Quisiera agradecer al Grupo de Estudios, especialmente a su presidente, Ami Rastas, y a su líder de proyecto, Pekka Järvinen, por la excelente calidad del trabajo. También me gustaría mencionar la importante participación de Risto Lautkaski y Seppo Vuori de VTT (Finlandia) y agradecer a Didier Beutier, AREVA (Francia); Christine Copley del Instituto Mundial del Carbón (Reino Unido); Luc Gagnon, Hydro-Québec (Canadá); y Bertrus Postmus, Gastransport Services (Países Bajos) por sus valiosos comentarios.

En un momento en que los encargados de tomar decisiones enfrentan difíciles asuntos en relación al cambio climático, estoy seguro de que este informe resultará muy oportuno.

François Ailleret
Presidente, Comité de Estudios, CME
Julio 2004

RESUMEN EJECUTIVO

A. OBJETIVOS Y ALCANCE

Un número rápidamente creciente de personas en todo el mundo se está preocupando por los asuntos ambientales, incluyendo el agotamiento de los recursos naturales, las emisiones y la contaminación, la deforestación y la degradación del suelo. La prestación desde el punto de vista ambiental de los productos, servicios y procesos se ha convertido en uno de los asuntos claves en el mundo actual, y es importante examinar los modos en los cuales se evalúan los efectos negativos sobre el medio ambiente. Una de las herramientas de análisis que puede utilizarse a este fin es la *evaluación del ciclo de vida* (ECV). El objetivo de la ECV es describir y evaluar los impactos ambientales totales de una acción determinada analizando todas las etapas del proceso completo desde la provisión de materia prima, producción, transporte y generación de energía hasta el reciclado y las etapas de eliminación de desechos – siguiendo el uso real, en otras palabras, “de la cuna a la tumba”.

Los resultados finales e intermedios de la ECV ayudarán a los encargados de tomar decisiones a seleccionar el producto o proceso que tenga el menor impacto sobre el medio ambiente. Esta información puede utilizarse para seleccionar un producto o proceso, junto con otros factores tales como los datos sobre costo y rendimiento. La ECV incluye la transferencia de impactos ambientales de un medio a otro (Ej. eliminar las emisiones al aire creando en su lugar vertidos de aguas residuales) y/o de una etapa a otra del ciclo de vida (Ej. desde la fase de uso y reutilización del producto hasta la fase de adquisición de la materia prima). Sin una ECV, la transferencia podría no ser reconocida y adecuadamente incluida en el análisis dado que está fuera del alcance o centro de interés típico de los procesos de selección de producto.

El Consejo Mundial de la Energía (CME) decidió incluir un estudio comparativo de ECV de varias formas de producción de energía en su Programa de Estudios 2002-2004. El objetivo era identificar los estudios existentes acerca de la ECV, analizarlos y preparar un informe de recopilación. No hubo intenciones de realizar un nuevo estudio.

Los resultados de este trabajo se presentan según los siguientes usos finales:

- Electricidad;
- Calefacción de locales;
- Transporte.

B. ELECTRICIDAD

Dado que la energía bajo la forma de electricidad es un importante insumo en muchos procesos industriales, y dado que hay varias alternativas para la producción de energía, se han realizado muchas ECV sobre producción de electricidad en numerosos institutos y compañías en todo el mundo. La producción combinada de electricidad y la calefacción urbana también ha sido estudiada. Las emisiones que se toman en cuenta son los gases de efecto invernadero, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas y materiales radioactivos. La Figura B.1 presenta una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de los sistemas de energía fósil, renovable y nuclear. Se han dividido las emisiones en directas (chimenea) e indirectas (otras etapas del ciclo de vida). La gama de emisiones evaluadas se indica presentando los valores máximos (alto) y mínimos (bajo) de varios estudios de ECV.

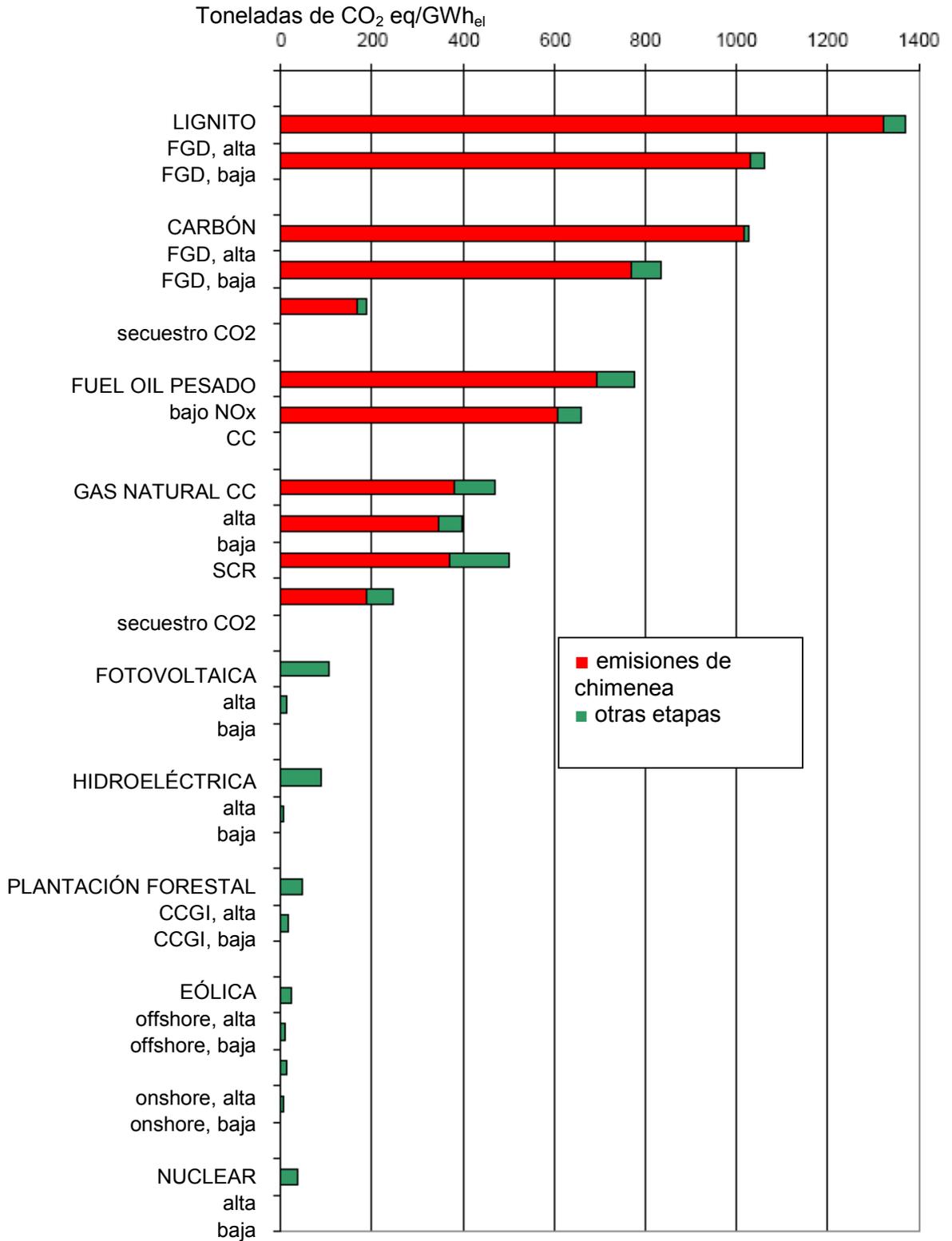


Figura B.1 (comparar con Figura 6.1)

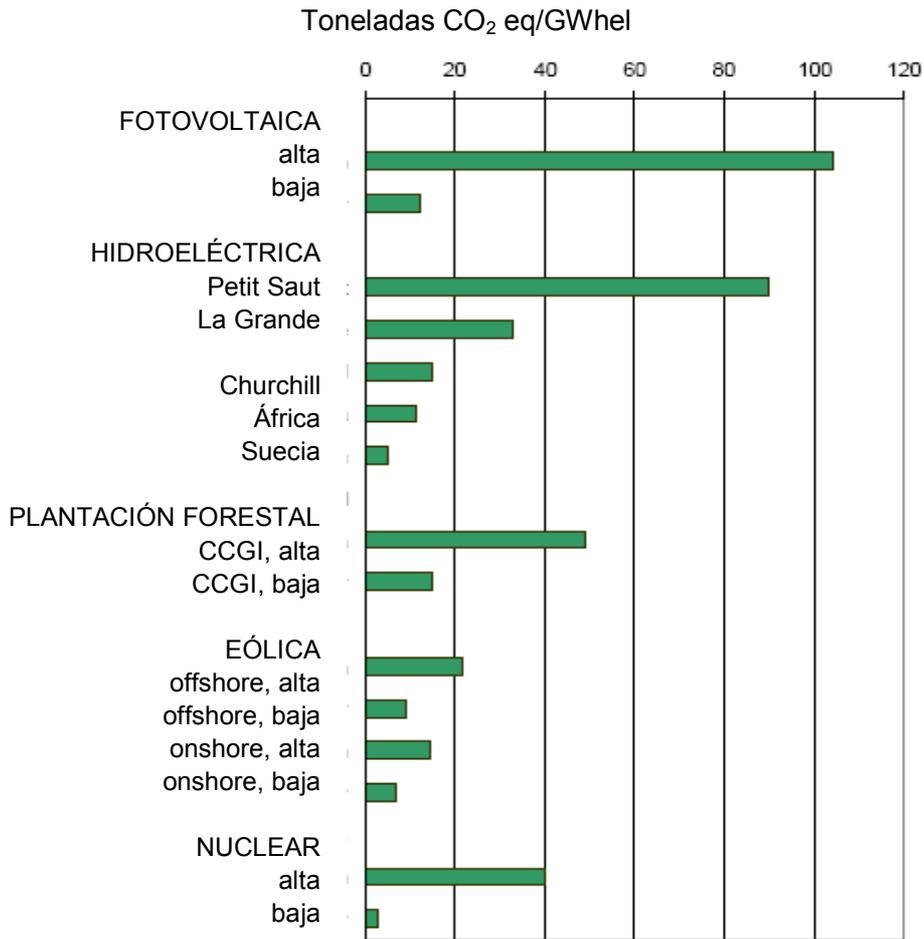


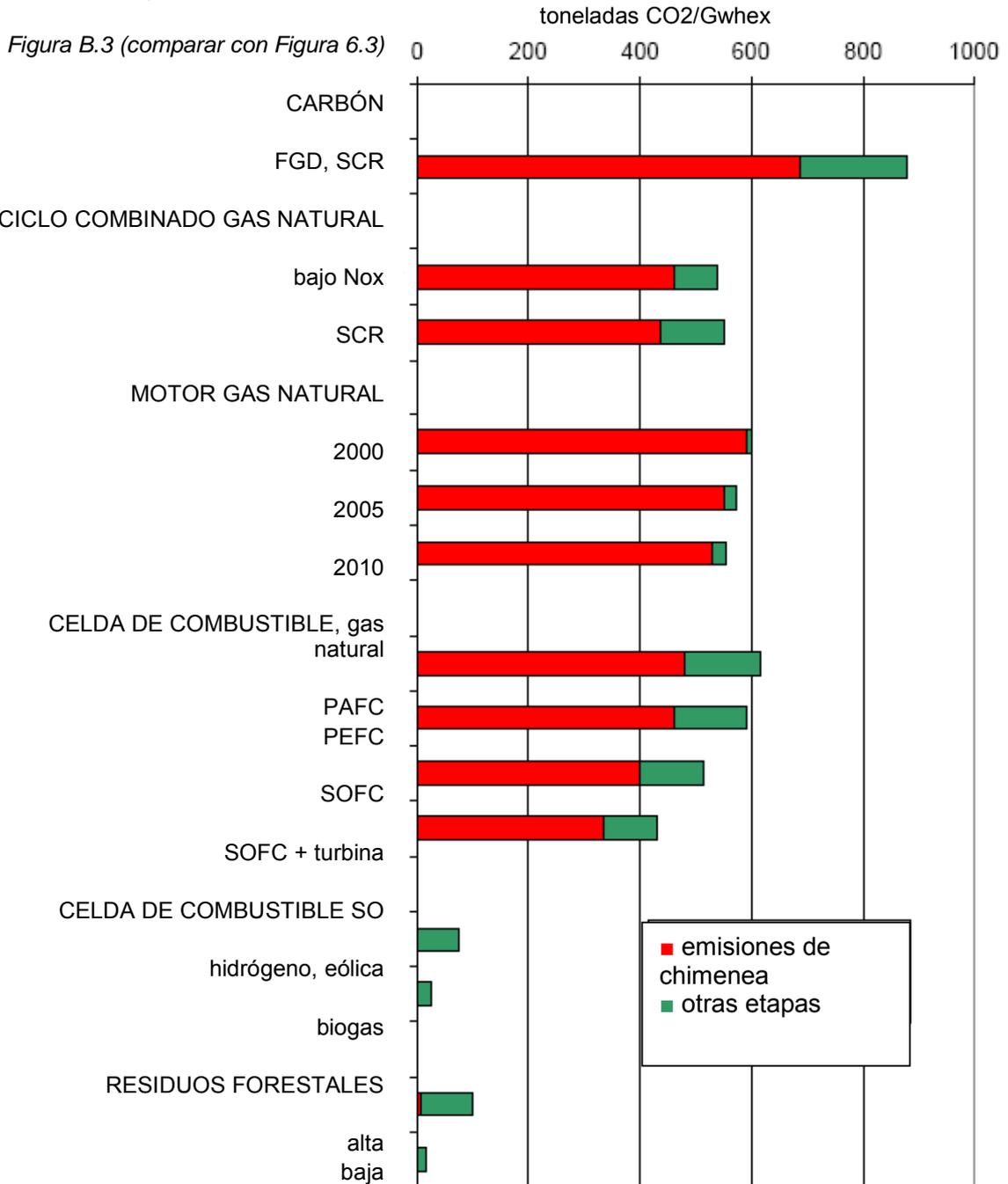
Figura B.2 (comparar con Figura 6.2)

La Figura B.2 presenta las emisiones de gases de efecto invernadero para los sistemas de energía renovable y nuclear en una escala que permite la comparación entre las diferentes alternativas. Una característica común de estas fuentes de energía es que las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos surgen de otras etapas del ciclo de vida que no son la generación de electricidad. Dichas etapas son la extracción de material prima, fabricación de componentes, transporte de combustible y material y construcción y desmantelamiento de instalaciones. Las emisiones provenientes de estas etapas dependen de muchos factores diferentes, por ejemplo, la matriz de producción de energía eléctrica específica de un país. En países donde la mayor parte de la electricidad se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles, las emisiones son más elevadas que en los países que utilizan menos combustibles fósiles en la producción de energía.

La Figura B.3 es un resumen de las emisiones de gases de efecto invernadero para los ciclos de combustibles con producción combinada de calor y electricidad (PCCE). Las emisiones totales de gases de efecto invernadero se expresan en toneladas de equivalente de CO₂ por 1 GWh de energía producida. La exergía es una medida de la parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico.

C. CALEFACCIÓN DE LOCALES

La Figura C.1 es un resumen de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de sistemas alternativos de calefacción de locales. El calor es producido por estufas que queman productos de carbón y por calderas que queman fuel oil liviano, gas natural, gas licuado de petróleo o astillas de madera. La electricidad que se introduce en los calentadores eléctricos es producida en centrales energéticas de condensación alimentadas a gas natural, fuel oil o carbón.



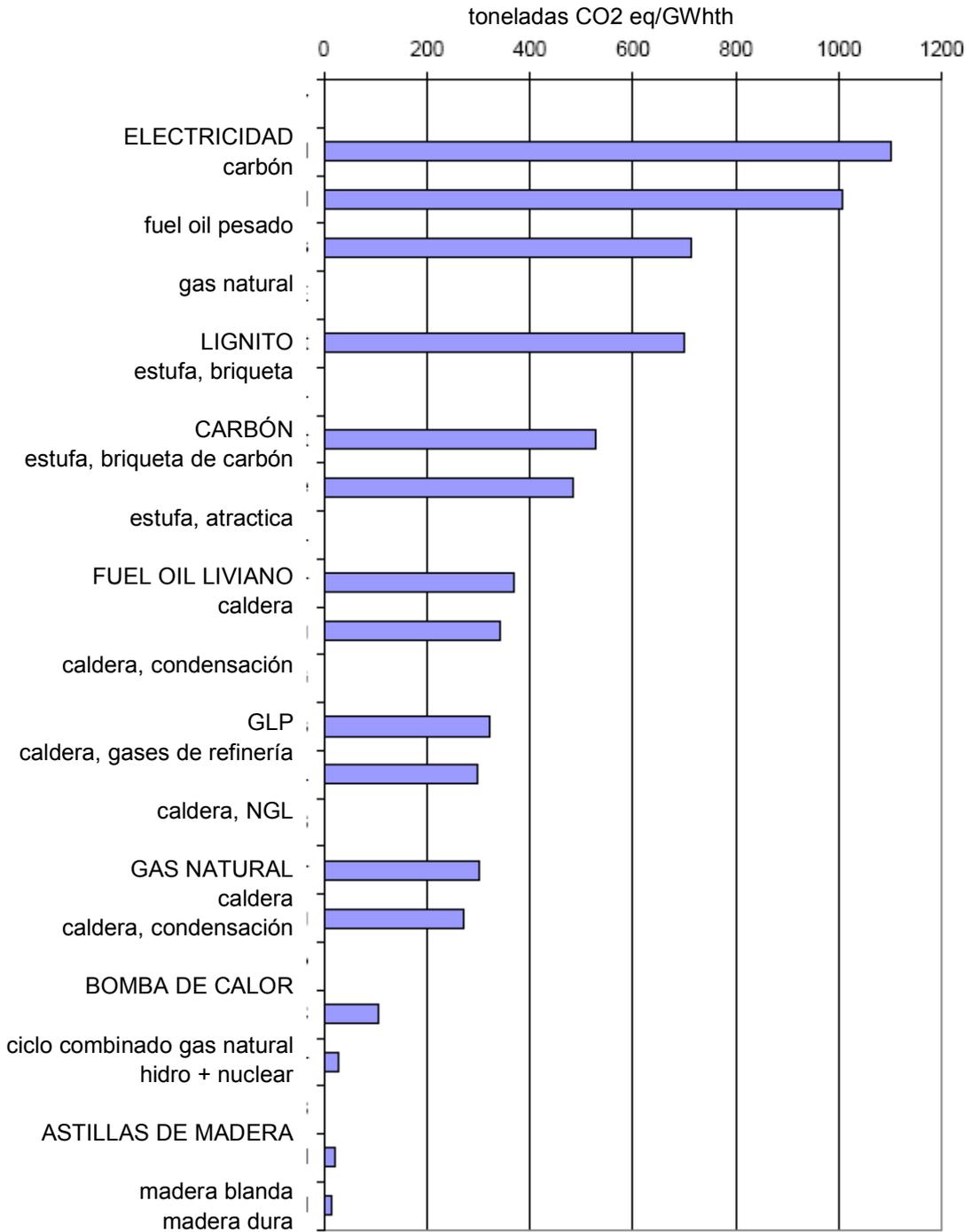


Figura C.1 (comparar con Figura 6.4)

D. TRANSPORTE

La evaluación del ciclo de vida ha sido aplicada a la evaluación comparativa de combustibles y tecnologías alternativas para los automóviles que se espera estén disponibles en el futuro cercano. Actualmente, 99% de la energía consumida en el transporte por carretera se basa en el petróleo crudo. Las emisiones de dióxido de carbono son el resultado no sólo de la combustión del combustible por parte del vehículo,

sino también de la extracción, transporte, producción y distribución del combustible. El tráfico vial es una fuente principal de emisiones de dióxido de carbono en los países industrializados y se espera que sea una fuente principal de nuevas emisiones en los países en desarrollo a medida que la renta disponible de la población aumente con el crecimiento económico.

Las cadenas de combustibles alternativas pueden involucrar el uso de fuentes alternativas de energía primaria, tecnologías de producción de combustible innovadoras, nuevos combustibles para los automóviles o trenes motrices innovadores para los vehículos. Las fuentes de energía primaria aparte del petróleo crudo pueden ser gas natural, biomasa, energía hidroeléctrica, eólica o solar.

Dado que hay tantas combinaciones de trenes motrices a combustible, habitualmente se realiza la evaluación del ciclo de vida en dos etapas. La primera se llama “pozo-a-tanque” y abarca la extracción, transporte, producción y distribución del combustible. La segunda etapa se llama “tanque-a-rueda” y abarca la conversión de la energía del combustible en movimiento del vehículo. Una evaluación completa del ciclo de vida combina los resultados de estas dos etapas y se llama “pozo-a-rueda”. La Figura D.1 muestra las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de combinaciones de tren motriz a combustible seleccionadas.

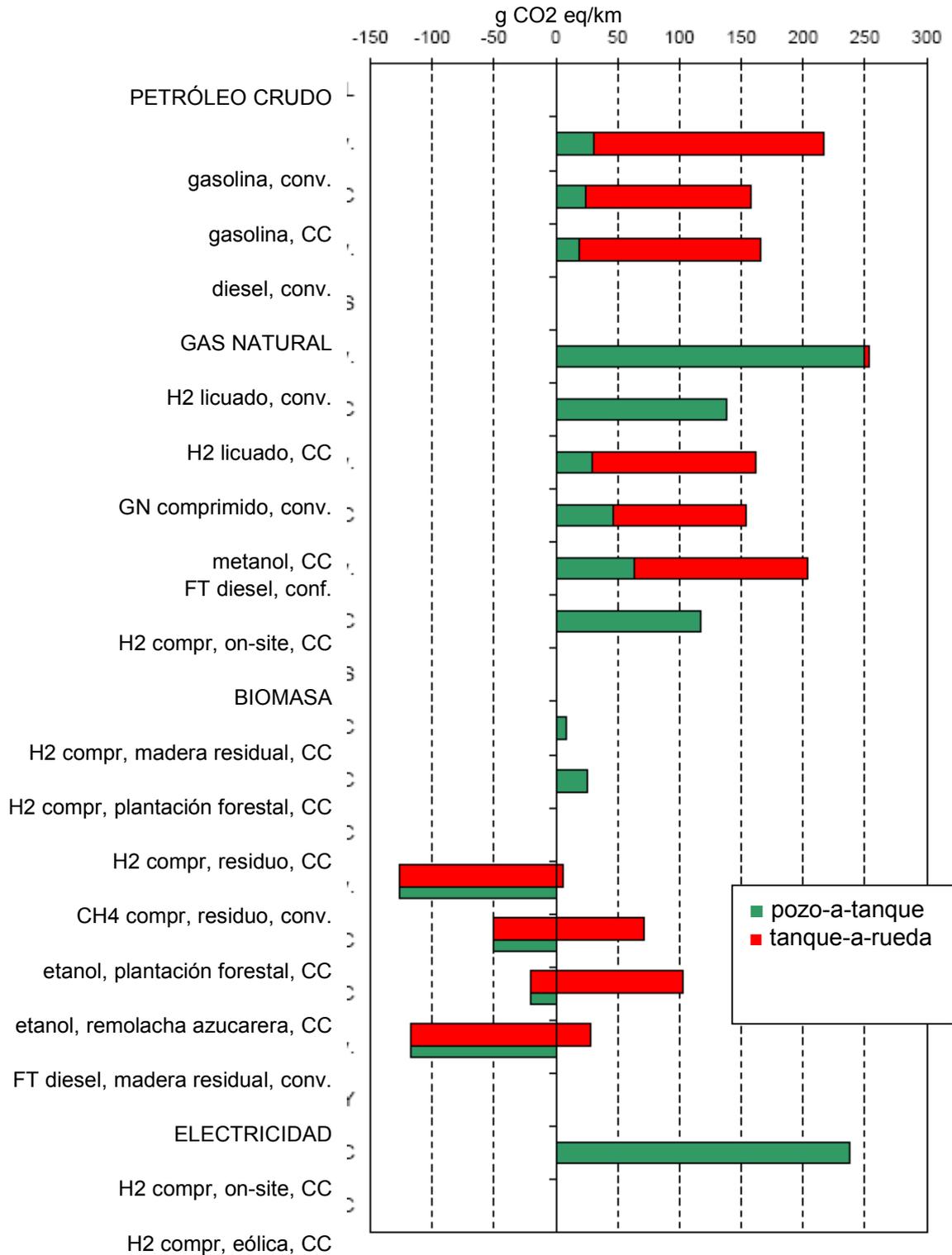


Figura D.1 (comparar con Figura 6.5)

E. OTROS EFECTOS

La evaluación del ciclo de vida de las emisiones provenientes de la producción y transporte de energía ha sido el objetivo principal de los estudios debido a las convenciones internacionales para el control de emisiones y los impactos directos e indirectos sobre la salud y el medio ambiente. Para las evaluaciones del ciclo de vida de la producción de energía, también se han considerado otros factores relacionados con el uso racional de la energía, los recursos naturales y la tierra. Esta clase de análisis ha sido utilizada para comparar entre sí los ciclos de la energía renovable y fósil. Dado que muchas energías renovables (particularmente solar y eólica) son "diluidas", se necesitan más materiales y áreas de mayor extensión que para las energías fósiles.

Existen estudios comparativos sobre los requisitos de terreno de las diferentes opciones de generación de electricidad. El problema de dichas comparaciones es que las áreas calculadas no son comparables en su totalidad. La zona puede tener otros usos simultáneos no relacionados con la generación de electricidad. Por ejemplo una represa hidroeléctrica también puede ser utilizada para el control de las inundaciones o para riego y a veces para pesca y recreación. Un área de plantación forestal también puede ser utilizada para recreación. Los módulos solares fotovoltaicos generalmente se instalan sobre techos que no tienen otro uso alternativo.

Un modo de comparar las diferentes opciones de generación de electricidad es calcular el llamado tiempo de retorno energético del ciclo de vida. Este concepto se define como el tiempo requerido por el equipo de generación de electricidad para producir la cantidad de energía igual a la energía utilizada para construir, mantener y alimentar este equipo, convertido a la cantidad correspondiente de energía eléctrica. Otro modo de presentar el resultado de dicho análisis es calcular la llamada tasa de energía retornada del ciclo de vida. Se trata de tasa de energía eléctrica neta producida a lo largo de la vida de una central y la energía requerida para construir, mantener y alimentar la central a lo largo de su vida.

F. OBSERVACIONES

Las cuestiones concernientes a la accesibilidad de la energía (relacionadas con los costos directos de la energía), la disponibilidad de energía (relacionadas con la seguridad/fiabilidad del suministro) y la aceptabilidad de la energía (impactos ambientales y externalidades) forman un marco para los encargados de tomar decisiones que ayuda a medir las cualidades relativas de las diferentes opciones. La ECV puede ser útil para los asuntos relacionados a los impactos ambientales, pero en una ECV normalmente se incluye sólo un subconjunto de estos impactos. También se puede sostener con razón que algunas de las externalidades no pueden ser cubiertas por la metodología de la ECV – o cualquier otro método analítico – pero se las debe abordar dentro del proceso político.

Las opciones energéticas difieren en naturaleza y escala de los impactos ambientales. La Tabla F.1 ilustra las características relativas de varias fuentes de energía primaria en el contexto de unos pocos factores claves que juegan un rol esencial en la toma de decisiones, y que en la mayor parte de los casos están cubiertas en los estudios de ECV.

Tabla F.1. Aspectos característicos relativos de varias fuentes de energía primaria en vista de factores claves relacionados con la toma de decisiones basada en resultados de estudios de ECV.

Factores importantes para la toma de decisiones	Basada en la combustión				nuclear	hidro	eólica	solar
	carbón	petróleo	gas	biomasa				
Accesibilidad de la energía (relacionado con los costos directos de la energía)	F	M	M	M	F	F	D	D
Disponibilidad de la energía (relacionada con la dimensión seguridad /fiabilidad)	F	M	M	M	F	F	D	D
Aceptabilidad de la energía (externalidades ambientales)	D	D	M	F	F	F	F	F

Clasificaciones relativas en la perspectiva de factores importantes para la toma de decisiones:

F = fuente de energía en posición **favorable**

M = fuente de energía en posición **media/neutral**

D = fuente de energía en posición **desfavorable**

Además de los resultados de los estudios de ECV, se deben tener en cuenta otros factores al tomar decisiones sobre los sistemas energéticos. Por ejemplo, es difícil comparar los impactos potenciales a largo plazo causados por la mayor cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera o los futuros impactos provocados por potenciales emisiones de depósitos de residuos nucleares o agregarlos a otros tipos de impactos. Además, el agotamiento gradual de los recursos energéticos primarios está llevando a la explotación de recursos menos favorables y por lo tanto a mayores impactos ambientales.

Normalmente, las ECV se hacen para un propósito específico. Si se realiza un estudio comparativo, el analista tiene dos o más alternativas para comparar. Una de ellas podría ser la opción de no construir la central y en su lugar importar la electricidad. Existen varios sitios alternativos para la construcción de centrales.

Cuando se reúnen los resultados de estos tipos de estudios es necesario ser prudentes. Los resultados pueden no ser fácilmente exportables a diferentes metodologías, y si los informes no son transparentes, las elecciones que han hecho los analistas no pueden rastrearse. Algunas de estas elecciones pueden ser muy específicas para algunos casos y utilizar los resultados de dichos estudios en diferentes circunstancias podría llevar a la toma de decisiones sobre una base errónea.

Sin embargo, sumar la ECV al proceso de toma de decisiones provee una comprensión de los impactos sobre la salud humana y el medio ambiente no considerada tradicionalmente al seleccionar un producto o proceso. Esta valiosa información provee un modo de explicar los impactos completos de las decisiones, especialmente aquellos que tienen lugar fuera del sitio, que están directamente influidos por la selección de un producto o un proceso. La ECV es una herramienta para proveer mejor información a los encargados de tomar decisiones y se la debería incluir junto a otros criterios de decisión tales como el costo y el rendimiento para tomar una decisión bien equilibrada.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el reconocimiento de los asuntos ambientales y socioeconómicos ha aumentado enormemente. El público se está tornando cada vez más consciente de que el consumo de productos manufacturados y de servicios ofrecidos contribuye, al menos hasta algún punto, a los efectos adversos sobre los recursos y la calidad del medio ambiente. Estos efectos pueden tener lugar en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, desde la extracción de la materia prima hasta la fabricación, distribución y consumo del producto e incluyen una serie de opciones para la gestión de los residuos.

La evaluación del ciclo de vida (ECV) se desarrolló hace más de 30 años como herramienta para analizar asuntos ambientales. Puede utilizarse como instrumento para información y planificación, para dejar al descubierto los “puntos débiles” en el ciclo de vida de productos y servicios al igual que para realizar la comparación de alternativas posibles. Los resultados de una ECV pueden además ser utilizados para mejorar la compatibilidad ambiental de productos y servicios.

La producción de energía tiene claros impactos ambientales y sobre la salud. A este respecto, existen variaciones significativas entre las diferentes formas de producción de energía. Por lo tanto es importante aplicar la metodología de ECV para comparar los impactos ambientales y sobre la salud de varias formas de energía. La profundidad y amplitud de los estudios de ECV han sido considerablemente diferentes, dependiendo del objetivo del estudio en particular.

El Consejo Mundial de la Energía (CME) decidió incluir la ECV de varias formas de producción de energía en su Programa de Estudios 2002-2004. El objetivo fue identificar los estudios existentes sobre ECV, analizarlos y preparar un informe de recopilación. No hubo intenciones de realizar un nuevo estudio. *Por lo tanto el objetivo estuvo limitado a proveer a los miembros del CME y a la comunidad internacional una comparación de las diferentes formas de producción de energía basadas en los estudios totales de ECV realizados durante los últimos 10–15 años.* “ECV Total” significa que se tiene que tomar en cuenta toda la cadena de producción, desde exploración y extracción, procesamiento y almacenado, hasta transporte, transformación en combustibles secundarios y uso final.

Se creó un grupo de estudio (ver Anexo A) dependiente del Comité de Estudios del CME para realizar el estudio de ECV del CME. A tal fin, se invitó a los miembros del grupo de estudios a que identificaran los estudios de ECV pertinentes finalizados o en curso. El grupo se reunió dos veces: el 13 de diciembre de 2002 en Londres y el 13 de septiembre de 2003 en Kiev. En la preparación de este informe de recopilación participaron expertos del Centro de Investigación Técnica de Finlandia (VTT).

En el Capítulo 3 de este informe se brinda una descripción general del método ECV. En el Capítulo 4, se presentan los beneficios y las limitaciones de la ECV, se analizan brevemente los posibles usos de los resultados de la ECV y se brinda una introducción a la ECV en la generación de electricidad. El Capítulo 5 presenta un resumen de emisiones gaseosas, de partículas y radioactivas provenientes de la producción y uso de energía y describe la cooperación internacional para el control de emisiones. El Capítulo 6 presenta los resultados de la comparación según los siguientes usos finales:

- Electricidad;
- Calefacción de locales;

- Transporte.

Los Capítulos 7 y 8 señalan las observaciones y conclusiones de las ECV para varias fuentes de energía primaria, y se indican las áreas posibles para la investigación futura.

Todas las metodologías de evaluación tienen sus limitaciones, y es importante comprender que esto también es cierto para la ECV. Por ejemplo, la naturaleza de las opciones y de las suposiciones hechas en la ECV pueden ser subjetivas. La comparación de resultados de diferentes estudios de ECV sólo es posible si las suposiciones y el contexto de cada estudio son similares. Generalmente, la información desarrollada en un estudio de ECV debería utilizarse únicamente como parte de un proceso de decisión mucho más abarcador o para comprender los equilibrios amplios o generales.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El Consejo Mundial de la Energía decidió lanzar este análisis de los estudios de evaluación del ciclo de vida (ECV) y sus resultados como parte de su Programa de Trabajo a fin de ilustrar qué es la ECV, cómo ha sido aplicada para la producción y uso de energía, qué clases de resultados ha producido el método y cómo pueden utilizarse estos resultados.

De los tres objetivos del CME de accesibilidad de la energía (relacionado con los costos directos de la energía), disponibilidad de energía (relacionado con la dimensión de seguridad/fiabilidad) y aceptabilidad de la energía (impactos ambientales o externalidades), la ECV se asocia principalmente con la aceptabilidad de la energía.

El estudio del CME *Actuadores en la Escena Energética* [ver Ref. 2.1 al final de este capítulo] estimula la reflexión sobre cómo el sistema energético mundial ha funcionado en la práctica, cuáles han sido las dinámicas de los mercados energéticos y cómo los objetivos de accesibilidad de la energía, disponibilidad de la energía y aceptabilidad de la energía han tenido un impacto sobre el producto bruto interno (PBI) y viceversa.

El informe de los *Actuadores* se centra en las trayectorias del PBI y de la energía en el pasado, examina los desafíos que enfrenta la escena energética en la actualidad y aborda la retroalimentación económica, social, ambiental y tecnológica más importante, estableciendo que:

“Entre los factores que pueden afectar en forma negativa el crecimiento del PBI se encuentra la cuestión del medio ambiente: el cambio climático se ha convertido en un asunto político a la vez que científico debido al recalentamiento de la tierra, fenómeno que tiene lugar cuando la atmósfera no puede reciclar todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Dado que la mayor parte de estas emisiones se origina en la producción y uso de la energía, principalmente en la quema de combustibles fósiles y la liberación directa de gases tales como el metano, existe la posibilidad de que los objetivos de emisiones nacionales o mundiales puedan dar como resultado la fijación de impuestos o regulaciones que lleven a un fuerte aumento en los precios de la energía.

Entonces, aunque el medio ambiente, o la aceptabilidad de la energía, no ha sido un actor principal en la escena energética hasta el momento, podría convertirse en un factor clave en el futuro, posiblemente con impactos negativos para el crecimiento del PBI al menos en el orden de magnitud de una serie de serias crisis energéticas.” [Ref. 2.1]

Este estudio trata de ilustrar cómo los resultados obtenidos por un método específico, ECV, pueden ayudar a los encargados de tomar decisiones para evaluar una infinidad de impactos ambientales presentes en varias opciones energéticas.

La consideración equilibrada de los impactos ambientales en la toma de decisiones se torna más fácil si se pueden examinar los impactos en una escala común. Se han desarrollado metodologías de evaluación especializadas para convertir los impactos a una escala común desde varios puntos de partida. Los ejemplos de dichas metodologías incluyen evaluación del ciclo de vida, métodos para la evaluación de costos ambientales externos y métodos que utilizan opiniones expertas colectivas de un modo más o menos estructurado por parte de varios paneles de expertos.

En la ECV, el objetivo es describir los impactos ambientales totales de una cierta operación analizando todas las etapas de la totalidad de la cadena de transformación desde la extracción de la materia prima, producción, transporte y generación de energía hasta las etapas de reciclado y eliminación de desechos luego del uso real – en otras palabras, “de la cuna a la tumba”.

En la fase de evaluación, el objetivo es medir los varios impactos ambientales en una escala única. Los métodos ECV dan como resultado un puntaje del impacto; en los métodos para la evaluación de costos ambientales externos, los impactos ambientales se expresan en términos monetarios. El método de evaluación mediante un panel de expertos utiliza las opiniones de los expertos para la evaluación en lugar de cadenas directas de exposición-impacto directo.

En este informe, se brinda una descripción general del método ECV, se analizan una serie de estudios recientes sobre ECV en energía y se presenta una recopilación de sus resultados. Los estudios han sido seleccionados con el requisito de utilizar únicamente estudios originales como material fuente para asegurarse de que se puede llegar a las referencias originales de donde surgieron esos datos. Existe una gran cantidad de literatura acerca de la ECV, pero se ha realizado un esfuerzo para dar una buena visión de conjunto. La recopilación no es completa, pero si se tiene en cuenta que el objetivo limitado del estudio era proveer a los miembros del CME y a la comunidad internacional una comparación de las diferentes energías basándose en los análisis del ciclo de vida completo realizados en los últimos diez años, creemos que el objetivo original y la integridad de la tarea no se han visto comprometidos.

La evaluación del ciclo de vida contribuye a las acciones de políticas del CME resumidas en la declaración del milenio del CME, *Energía para el Mundo del Mañana - ¡Actuemos Ahora!* [Ref. 2.2], específicamente la Acción de Política 2: Mantener abiertas todas las opciones energéticas; Acción de Política 4: Precio de la energía para cubrir los costos y asegurar el pago; Acción de Política 7: Asegurar energía económicamente accesible para los pobres, y Acción de Política 8: Financiar la investigación, desarrollo y demostración. Al resumir los estudios existentes acerca del tema, el CME también será consecuente con su Acción de Política 9: Progresar en la educación y la información pública.

Referencias para el Capítulo 2

2.1. Consejo Mundial de la Energía. *Actuadores en la Escena Energética*. Consejo Mundial de la Energía: Londres. 2003. ISBN 0 946121 10 9

2.2. Consejo Mundial de la Energía. *Energía para el Mundo del Mañana – ¡Actuemos Ahora!* Consejo Mundial de la Energía: Londres. 2000. Disponible en línea en:

www.worldenergy.org

3. EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA

La sociedad está preocupada por los asuntos relacionados con el agotamiento de los recursos naturales y la degradación ambiental. La prestación desde el punto de vista ambiental de los productos y procesos se ha convertido en un asunto clave, por lo cual se están investigando modos de reducir al mínimo los efectos sobre el medio ambiente. Una herramienta para tal fin es la llamada *evaluación del ciclo de vida* (ECV)¹. Este concepto considera la totalidad del ciclo de vida de un producto. En el caso de este estudio, el producto es la electricidad o la energía producida.

La ECV es un método general apropiado para analizar productos, procesos o servicios sin importar su naturaleza o alcance. El método fue lanzado en la década de 1960 como modo de analizar las alternativas de embalaje y otras mercancías a granel. Más adelante, el método siguió desarrollándose y se lo utilizó para analizar productos que no son mercancías, incluyendo las alternativas de generación de electricidad. La ECV es una herramienta orientada al producto para analizar los impactos ambientales causados por un producto, proceso o servicio específico. En este capítulo, se brinda una descripción general del procedimiento de ECV.

El ciclo de vida de un producto comienza con la extracción de la materia prima de la tierra para crear el producto y finaliza en el punto en que todos los materiales vuelven a la tierra. En una ECV, se intenta incluir todas las etapas de la vida del producto en una evaluación, suponiendo que son interdependientes, es decir, que una operación lleva a la siguiente. La ECV hace posible calcular los impactos ambientales acumulativos resultantes de todas las etapas en el ciclo de vida del producto, a menudo incluyendo impactos no considerados en análisis más tradicionales (por ejemplo, extracción de materia prima, transporte del material, eliminación definitiva del producto, etc.). Por lo tanto, la ECV provee un análisis exhaustivo de los aspectos ambientales del producto o proceso y un panorama más exacto de las compensaciones ambientales verdaderas en la selección del producto.

Específicamente, la ECV es una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los potenciales impactos asociados a un producto, proceso o servicio, mediante:

- recopilación de un inventario de insumos materiales y de energía pertinentes asociados a las emisiones al medio ambiente;
- evaluación de los potenciales impactos ambientales asociados a los insumos y emisiones identificados;
- interpretación de los resultados para facilitar la toma de una decisión más informada.

Los insumos pueden dividirse en las siguientes etapas:

- Materias primas;
- Fabricación;
- Uso/reutilización/mantenimiento;
- Reciclado/gestión de residuos.

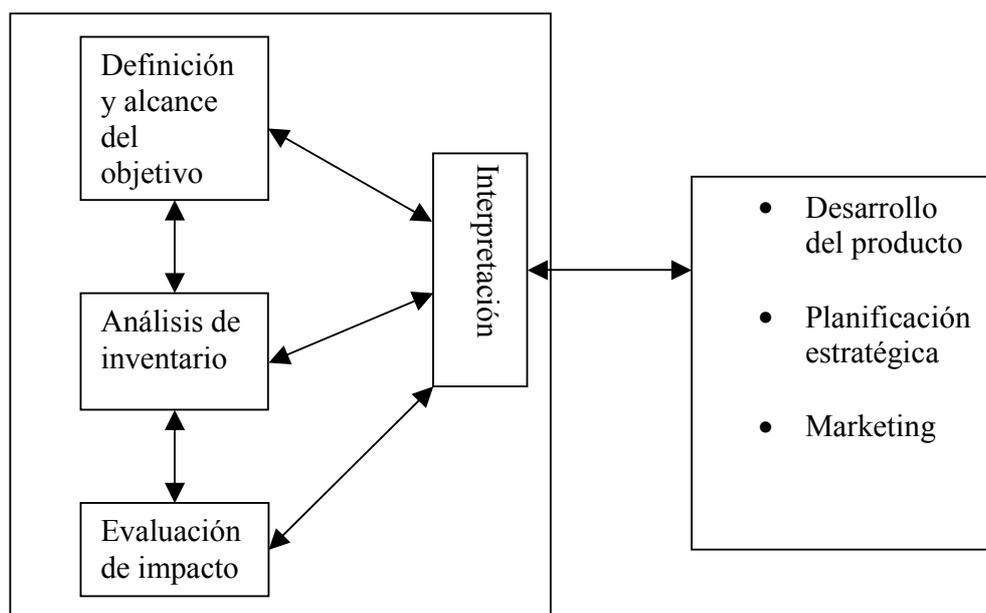
La producción sería la siguiente:

- Los productos;
- Emisiones atmosféricas;

¹ El término estandarizado es "evaluación del ciclo de vida". Ha sido habitual llamarlo "análisis del ciclo de vida". A los fines de este informe, estos términos pueden ser considerados sinónimos.

- Vertidos al agua;
- Residuos sólidos;
- Coproductos;
- Otras emisiones.

El proceso de ECV es un enfoque sistemático que consta de cuatro etapas: definición y alcance del objetivo, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación, tal como se ilustra en la Figura 3.1.



Fuente: SFS-EN ISO 14040

Figura 3.1. Etapas de la evaluación del ciclo de vida [Ref. 3.1], destacando las tres fases principales: definición y alcance del objetivo, análisis de inventario y evaluación de impacto; cada una de estas fases aparece conectada a una fase general llamada "Interpretación"

3.1. Definición y Alcance del Objetivo

La definición y el alcance del objetivo es la fase del proceso de ECV que define el propósito y el método para incluir los impactos ambientales del ciclo de vida en el proceso de toma de decisiones.

Las siguientes seis decisiones básicas deberían tomarse al comienzo del proceso de ECV para utilizar en forma efectiva el tiempo y los recursos:

- Definir el/los objetivo/s del proyecto.
- Determinar qué tipo de información necesitan los encargados de tomar decisiones.
- Determinar cómo deberían organizarse los datos y cómo se deberían exhibir los resultados.

- Determinar qué se incluirá y qué no se incluirá en la ECV.
- Determinar la exactitud requerida para los datos.
- Determinar reglas básicas para la realización del análisis.

3.2. Análisis de Inventario

El Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es el proceso de cuantificar los requisitos de energía y materias primas, emisiones a la atmósfera, vertidos al agua, residuos sólidos y otras emisiones provenientes de la totalidad del ciclo de vida de un producto, proceso o actividad.

En la fase de inventario del ciclo de vida de una ECV, se recogen y organizan todos los datos pertinentes. Sin un ICV, no existe una base para evaluar los impactos ambientales comparativos o las potenciales mejoras. El nivel de exactitud y detalle de los datos recogidos se refleja en el resto del proceso de ECV.

Resultados del Inventario del Ciclo de Vida

El resultado del análisis de inventario del ciclo de vida es una lista que contiene las cantidades de contaminantes liberados al medio ambiente y la cantidad de energía y de materiales consumidos en el ciclo de vida del producto. Según el alcance, el contenido de energía de los insumos materiales puede rastrearse aún hasta el uso de combustible y material del proceso upstream si es necesario. La información puede organizarse por etapa del ciclo de vida, medio (aire, agua, tierra), proceso específico o cualquier combinación de ellas que concuerde con las reglas básicas definidas en la fase de definición de objetivo y alcance para informar acerca de los requisitos.

Pasos claves de un Inventario del Ciclo de Vida

El Inventario del Ciclo de Vida puede dividirse en fases separadas de diversas maneras. La siguiente descripción está adoptada de las pautas de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. [Refs. 3.2, 3.3]. La combinación de estos dos documentos de orientación provee el marco para realizar un análisis de inventario y evaluar la calidad de los datos utilizados y los resultados. Los dos documentos definen los siguientes pasos de un inventario del ciclo de vida:

- Desarrollo de un diagrama de flujo del proceso que se está evaluando.
- Desarrollo de un plan de recolección de datos.
- Recolección de datos.
- Evaluación e informe de los resultados.

El flujo del proceso se divide en una serie de *procesos unitarios* interconectados. Se analizan sus conexiones dentro de la cadena de proceso. Se analizan todos los insumos y productos para cada uno de estos pasos. Finalmente, se resumen todos ellos para brindar un panorama total del proceso. La Figura 3.2 ilustra el concepto de proceso unitario.

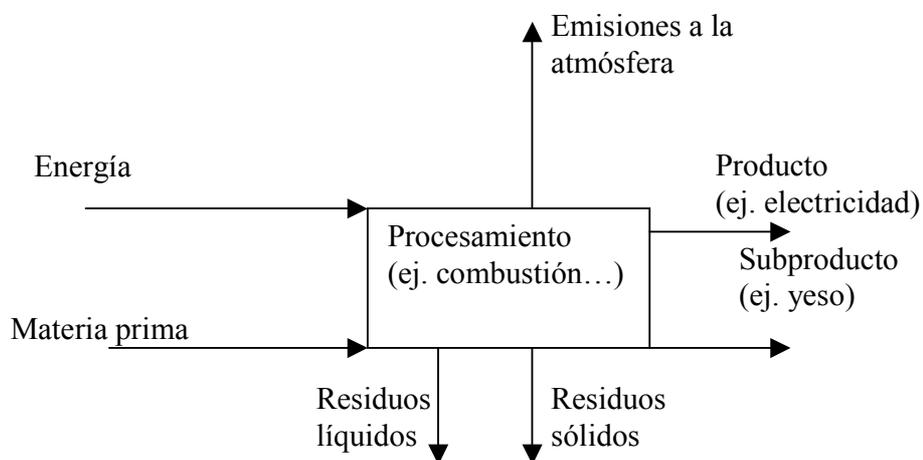


Figura 3.2. Plantilla de insumo/producto de procesos unitarios

No existe ninguna lista pre-definida de objetivos de calidad de los datos para todos los proyectos de ECV. La cantidad y naturaleza de los objetivos de calidad de los datos depende necesariamente del nivel de exactitud requerido para informar a los encargados de tomar decisiones involucrados en el proceso. En cada proyecto, se debe tomar la decisión acerca de dónde se necesitan datos específicos de los sitios y los procesos y dónde son suficientes los datos aproximados o genéricos. Un método para reducir el tiempo y los recursos para la recolección de datos es obtener datos de inventario no específicos de un sitio. Varias organizaciones han desarrollado bases de datos específicamente para ECV que contienen algunos de los datos básicos comúnmente necesarios para construir un inventario del ciclo de vida.

Al documentar los resultados del inventario del ciclo de vida, es importante describir minuciosamente la metodología utilizada en el análisis, para definir los sistemas analizados y los límites impuestos y para notar todas las suposiciones hechas al realizar el análisis del inventario.

3.3. Evaluación del Impacto

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) de una ECV es la evaluación de los impactos potenciales sobre la salud humana y sobre el medio ambiente de los recursos ambientales y las emisiones identificadas durante el inventario del ciclo de vida (ICV). La evaluación del impacto debería abordar los efectos ecológicos y los efectos sobre la salud humana; también puede abordar el agotamiento de los recursos.

Una evaluación del impacto del ciclo de vida trata de establecer una conexión entre el producto o proceso y sus potenciales impactos ambientales. Por ejemplo:

- ¿Cuáles son los impactos de emisiones de 9.000 toneladas de dióxido de carbono o 500 toneladas de metano liberadas a la atmósfera?
- ¿Cuál es peor?
- ¿Cuáles son sus impactos potenciales sobre el smog o el calentamiento global?

Una EICV provee un procedimiento sistemático para clasificar y caracterizar estos tipos de efectos ambientales. En la Tabla 3.1 se enumeran las categorías de impacto típicas y los ejemplos de agentes agresores asociados a estas categorías de impacto. La intención de la tabla es servir como ejemplo y de ninguna manera es completa.

Las emisiones o los agentes agresores ambientales dentro de una categoría de impacto pueden hacerse conmensurables en base a sus propiedades físico-químicas. Al utilizar factores de caracterización basados en la ciencia, una EICV puede calcular los impactos de cada emisión al medio ambiente sobre problemas tales como el smog o el calentamiento global. Esto permite tomar en cuenta su amenaza relativa, aunque los impactos absolutos de, por ejemplo, el cambio climático, son debatibles y puestos en duda.

Una evaluación del impacto también puede incorporar varias opiniones. Por ejemplo, en una región donde las concentraciones de contaminantes exceden los niveles objetivos, las emisiones al aire podrían ser relativamente más preocupantes que las mismas emisiones en una región con mejor calidad del aire.

Los resultados de una EICV proveen una lista de verificación que muestra las diferencias relativas en los potenciales impactos ambientales para cada opción. Por ejemplo, una EICV podría determinar qué producto/proceso causa más cantidad de gases de efecto invernadero o cuál podría matar más peces.

Tabla 3.1. Categorías de impacto de ciclo de vida comúnmente utilizadas; adaptadas de las pautas y principios de la APA de los EE.UU. [Ref. 3.2]

Categoría de impacto	Escala	Datos pertinentes de ICV	Factor de caracterización común	Descripción del factor de caracterización	
Calentamiento global	Mundial	Dióxido de carbono (CO ₂)	Potencial de calentamiento global	Convierte los datos de ICV en equivalentes de dióxido de carbono (CO ₂)	
		Óxido nitroso (N ₂ O)			
		Metano (CH ₄)			
		Clorofluocarbonos (CFCs)			
		Hidroclorofluocarbonos (HCFCs)			Nota: Los potenciales de calentamiento global pueden ser potenciales de 50, 100 o 500 años
		Bromuro de metilo (CH ₃ Br)			
Disminución de la capa de ozono estratosférico	Mundial	Clorofluocarbonos (CFCs)	Potencial de disminución de la capa de ozono	Convierte los datos de ICV en equivalentes de triclorofluormetano (CFC-11)	
		Hidroclorofluocarbonos (HCFCs)			
		Halones			

		Bromuro de metilo (CH ₃ Br)		
Acidificación	Regional	Óxidos de azufre (SO _x)	Potencial de acidificación	Convierte datos de ICV a equivalentes de ion de hidrógeno (H ⁺)
	Local	Óxidos de nitrógeno (NO _x)		
		Ácido clorhídrico (HCL)		
		Ácido fluorhídrico (HF)		
		Amoníaco (NH ₄)		
Eutrofización	Local	Fosfato (PO ₄)	Potencial de eutrofización	Convierte los datos de ICV en equivalentes de fosfato (PO ₄)
		Óxido de nitrógeno (NO)		
		Dióxido de nitrógeno (NO ₂)		
		Nitratos		
		Amoníaco (NH ₄)		
Smog fotoquímico	Local	Compuesto orgánico volátil no metánico (COVNM)	Potencial de creación de oxidante fotoquímico	Convierte datos de ICV en equivalentes de etano (C ₂ H ₆)
Toxicidad terrestre	Local	Químicos tóxicos con una concentración declarada letal para los roedores	CL ₅₀	Convierte datos de CL ₅₀ a equivalentes
Toxicidad acuática	Local	Químicos tóxicos con una concentración declarada letal para los peces	CL ₅₀	Convierte datos de CL ₅₀ a equivalentes
Salud humana	Mundial	Emisiones totales al aire, agua y suelo	CL ₅₀	Convierte datos de CL ₅₀ a equivalentes
	Regional			
	Local			
Agotamiento de los recursos	Mundial	Cantidad de minerales utilizados	Potencial de agotamiento de los recursos	Convierte datos de ICV a una proporción de cantidad de recursos utilizados en comparación con la cantidad de recursos que quedan en reserva
	Regional	Cantidad de combustibles fósiles utilizados		
	Local			
Uso de la tierra	Mundial	Cantidad depositada en un vertedero de basura	Residuos sólidos	Convierte la masa de residuos sólidos en volumen utilizando una densidad estimada.

3.4. Interpretación

La interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, controlar y evaluar la información proveniente de los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) y de la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y comunicarlos de modo eficaz. La interpretación del ciclo de vida es la última fase del proceso de ECV.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha definido los siguientes dos objetivos de la interpretación del ciclo de vida:

- Analizar resultados, llegar a conclusiones, explicar limitaciones y formular recomendaciones basadas en los hallazgos de las fases precedentes de la ECV e informar los resultados de la interpretación del ciclo de vida en forma transparente;
- Proveer una presentación fácilmente comprensible, completa y coherente de los resultados de un estudio de ECV, conforme al objetivo y el alcance del estudio [Ref. 3.5].

Referencias para el Capítulo 3

- 3.1 Organización Internacional de Normalización (ISO). *ISO 14040:1997 Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco*
- 3.2. Agencia de Protección Ambiental. *APA 1993 Evaluación del Ciclo de Vida: Pautas y Principios.*
- 3.3. ----- . *APA 1995 Pautas para la Evaluación de la calidad del Análisis del Inventario del Ciclo de Vida.*
- 3.4. *¿Qué es la ECV?* Presentación el taller sobre “Datos de Electricidad para los Inventarios del Ciclo de Vida”. 23-25 octubre, 2001 US EPA Andrew W. Breidenbach Research Center, Cincinnati, OH, EE.UU.
- 3.5. Organización Internacional de Normalización. *ISO 14043:2000 Gestión Ambiental Análisis del Ciclo de vida- Interpretación del ciclo de vida.*

4. COMPARIACIÓN DE ALTERNATIVAS UTILIZANDO LA INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Al llevar a cabo la ECV y la EICV, es necesario formular suposiciones, cálculos y decisiones de ingeniería basados en los valores de los actores involucrados. Cada una de estas decisiones debe incluirse y comunicarse en los resultados finales para explicar las conclusiones extraídas de los datos en forma clara y exhaustiva.

En algunos casos, puede no ser posible establecer que una alternativa es mejor que las otras debido a la incertidumbre en los resultados finales. Esto no implica que los esfuerzos hayan sido vanos. El proceso de ECV seguirá brindando a los encargados de tomar decisiones una mayor comprensión de los impactos ambientales y sobre la salud asociados con cada alternativa, donde tienen lugar (localmente, regionalmente o mundialmente) y la magnitud relativa de cada tipo de impacto en comparación con cada una de las alternativas propuestas incluidas en el estudio. Esta información revela con mayor profundidad los pros y los contras de cada alternativa.

4.1. Beneficios de la realización de una ECV

Una ECV abarca de forma exhaustiva todos los procesos y emisiones ambientales para un asunto ambiental dado, comenzando con la extracción de materia prima y la producción de energía utilizada para crear el producto mediante el uso y la disposición final del producto. La ECV extiende los análisis ambientales normales a la totalidad del ciclo de vida del producto. Por lo tanto también da cuenta de los impactos que se originan fuera de la jurisdicción local, regional e incluso nacional.

La realización de ECVs provee un enfoque de protección ambiental centrado en el producto, conforme a los conceptos de *gerenciamiento de productos* o *responsabilidad comercial durante todo el ciclo de vida*. Específicamente, la ECV provee información sobre cuál etapa del ciclo de vida de un producto provoca los mayores deterioros ambientales y así ayuda a los actores en las varias etapas del ciclo de vida del producto – fabricantes, minoristas, usuarios y eliminadores – a compartir la responsabilidad de la reducción de los impactos ambientales de los productos. La información proveniente de una ECV puede ayudar a centrar los esfuerzos donde son más efectivos para disminuir los impactos ambientales.

Al decidir entre dos alternativas, la ECV puede ayudar a los encargados de tomar decisiones a comparar todos los principales impactos ambientales causados por los productos, procesos o servicios.

Los resultados finales e intermedios de una ECV ayudarán a los encargados de tomar decisiones a seleccionar el producto o proceso que provoque el menor impacto sobre el medio ambiente. Esta información puede utilizarse con otros factores, tales como los datos de costo y rendimiento, para seleccionar un producto o proceso. Los datos de la ECV identifican la transferencia de impactos ambientales de un medio al otro (por ejemplo, eliminando las emisiones al aire creando en su lugar un efluente de aguas servidas) y/o de una etapa del ciclo de vida a otra (por ejemplo, del uso y la reutilización del producto hasta la fase de adquisición de materia prima). Si no se realizara una ECV, la transferencia podría no ser reconocida e incluida adecuadamente en el análisis por estar fuera del alcance típico de los procesos de selección de producto.

4.2. Limitaciones de la realización de una ECV

La realización de una ECV puede requerir grandes cantidades de recursos y de tiempo. Dependiendo de cuán detallada es la información que los usuarios desean abarcar en una ECV, la recolección de los datos puede ser problemática, y la disponibilidad de datos puede tener un gran impacto sobre la exactitud de los resultados finales. Por lo tanto es importante sopesar la disponibilidad de datos, el tiempo necesario para realizar el estudio y los recursos financieros requeridos en comparación con los beneficios pronosticados para la ECV.

El objetivo de realizar una ECV puede ser proveer más información de soporte para que los encargados de tomar decisiones puedan tomar mejores decisiones basadas más específicamente en los hechos, especialmente proveyendo un tipo particular de información (a menudo no tenida en cuenta), con una perspectiva de ciclo de vida sobre impactos ambientales y de salud humana asociados con cada producto o proceso. Sin embargo, la ECV no toma en cuenta el rendimiento técnico, el costo o la aceptación política y social. Por lo tanto, se recomienda que la ECV se use en conjunto con estos otros parámetros.

La ECV no determinará qué producto o proceso tiene mejor relación costo-beneficio o cuál funciona mejor. Por lo tanto la información desarrollada en un estudio de ECV debería utilizarse como un componente de un proceso de decisión más abarcador que evalúa las compensaciones entre el costo y el rendimiento.

4.3. ECV y Costo del Ciclo de Vida

Otro uso del término ciclo de vida se asocia con los cálculos de costos. El término costo del ciclo de vida (CCV) se utiliza al calcular los costos asociados con la construcción y uso de una instalación a lo largo de toda su vida útil.

Una diferencia fundamental entre la ECV y el CCV es el modo en que se manejan las cargas futuras. En la ECV, el factor de valor actual de las cargas medioambientales es igual a 1. En un cálculo de CCV, el valor actual es una función del factor de depreciación utilizado y el lapso de tiempo considerado.

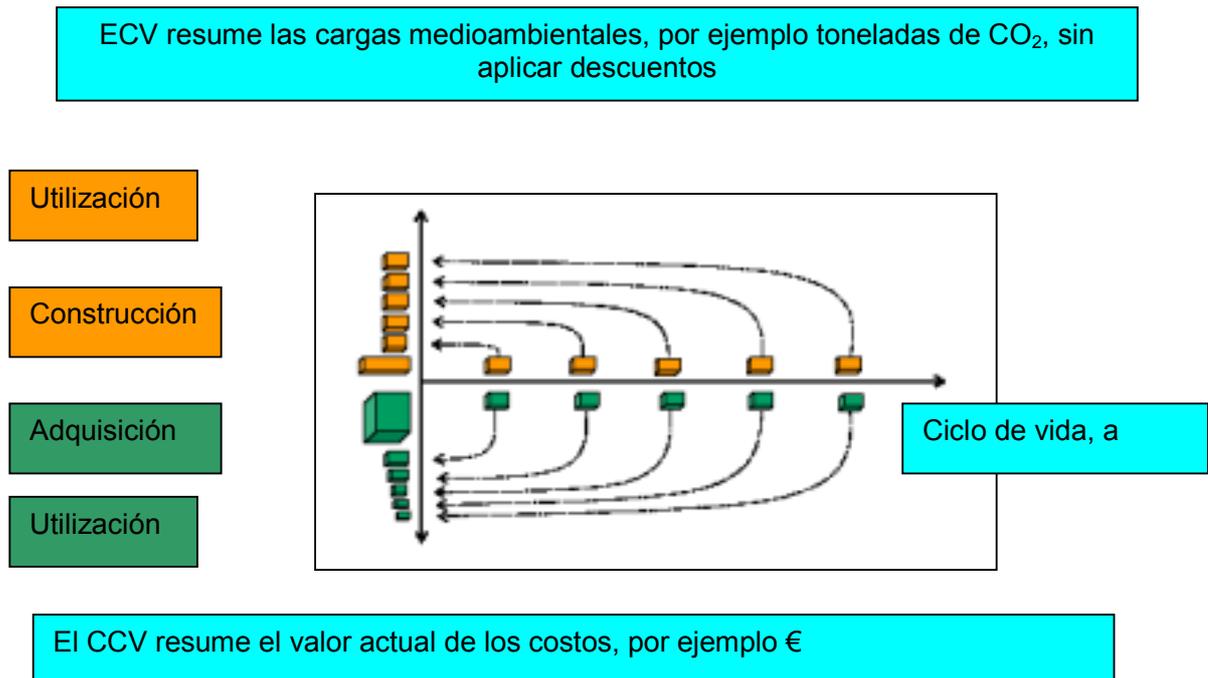


Figura 4.1. Manejo de los impactos o costos futuros en ECV y CCV

4.4. Usos de los datos de ECV

Los resultados de una ECV pueden tener varios usos además de su uso como ayuda en la toma de decisiones. Pueden utilizarse para informar a los consumidores, para educación, marketing, etc. Para algunas aplicaciones, hay reglas acerca de cómo los resultados de ECV puede ser obtenidos y aplicados, tales como:

- Proveer orientación acerca de los objetivos y principios que deberían enmarcar todos los programas y esfuerzos de etiquetado ambiental, incluyendo los programas profesionales y autodeclaración [Ref. 4.1], o
- Proveer orientación sobre el diseño y uso de evaluación de la prestación desde el punto de vista ambiental y sobre la identificación y selección de indicadores de prestación desde el punto de vista ambiental para ser utilizada por todas las organizaciones, sin importar su tipo, tamaño, ubicación y complejidad [Ref. 4.2].

Etiquetado ambiental

Se entiende por etiquetado ambiental la calificación de productos/procesos según uno o varios indicadores ambientales. La etiqueta infiere que un producto/proceso de la tecnología etiquetada tiene características ambientales notablemente mejores que, por ejemplo, un producto de referencia o el producto promedio en el mercado. Los impactos ambientales tanto del sistema de referencia como del sistema en cuestión surgen de un estudio de ECV.

Declaración de producto ambiental (DPA)

La intención de la declaración de producto ambiental (DPA) [Ref. 4.3] es desarrollar un perfil ambiental de un cierto producto, tomando en cuenta su producción y uso. El perfil depende claramente de datos específicos del sitio. El enfoque se realiza utilizando datos específicos del sitio para los procesos principales y datos genéricos para los procesos básicos, con menor influencia sobre el perfil ambiental. Los datos del ICV abarcan vectores energéticos, insumos materiales, uso de la tierra, productos principales y subproductos y varias categorías de residuos.

4.5. Aspectos de la ECV y Etapas de la Generación de Electricidad

La principal diferencia entre la producción de electricidad y de las mercaderías normales a granel es que el suministro y el consumo de electricidad deben ser equilibrados en todo momento. En las sociedades modernas, esto significa que la producción debe adaptarse al consumo. Al comparar resultados de estudios de ECV de los varios métodos de generación de electricidad, es necesario comprender que todas las opciones de generación pueden no ser alternativas verdaderas para un propósito específico. Además, debería entenderse que varias opciones de producción de energía provocan tipos de impactos completamente y genuinamente diferentes, tales como los gases de efecto invernadero y los hipotéticos accidentes o los potenciales impactos radiológicos a largo plazo de la eliminación de los residuos nucleares. Al agrupar o comparar estos tipos de impactos inevitablemente aparecen significativas incertidumbres, que subrayan la importancia de la transparente descripción de todas las suposiciones.

Algunas centrales son adecuadas para una operación de carga base, mientras que otras son utilizadas para producción de carga pico. Las centrales con fuerza motriz intermitente necesitan soporte ya sea del almacenamiento como de un tipo diferente de central.

En los sistemas de generación de electricidad, se incluyen las centrales con características operativas diferentes. Las características del sistema juegan un rol importante en la toma de decisiones para invertir en una nueva central. Es necesario tomar en cuenta la capacidad de la red, los acuerdos de soporte existentes, los tipos de carga y varios otros factores. En algunos casos, la coproducción de energía y calor puede ser factible. En los mercados eléctricos abiertos, es importante el costo de una oferta alternativa.

En sistemas de producción más grandes, el agregado de una central de grandes dimensiones afecta las características del sistema en menor proporción, mientras que agregar una central similar en un sistema más pequeño puede tener un mayor impacto sobre la operación del sistema de generación. Reconociendo que los clientes normalmente compran su electricidad mediante un operador de distribución, la electricidad que usan los clientes no es producto de una central única sino una mezcla proveniente de todas las centrales que operan en un sistema. Las características ambientales de la electricidad utilizada están determinadas por el sistema y varían con el tiempo. Estas variaciones no pueden incluirse en una ECV que compara diferentes alternativas de producción.

El ciclo de vida de las centrales de generación de electricidad puede dividirse en las siguientes fases principales del ciclo de vida:

- **Preparación del combustible:** Exploración/prospecciones de recursos de combustible, extracción y procesamiento de recursos de combustible (del combustible utilizado en el sistema de generación de electricidad estudiado, es decir, no pertinente para FV, eólica, geotérmica e hidroeléctrica), incluyendo transporte;
- **Infraestructura:** Construcción de central energética, incluyendo exploración/prospección de menas, minerales, etc., extracción de menas y minerales, fabricación de material, producción de componentes, construcción y deconstrucción de vehículos y caminos, transporte;
- **Operación:** Operación de la central energética, incluyendo fallos normales, producción de químicos operativos, incineración de residuos operativos, procedimientos de eliminación de residuos, manejo de residuos de combustibles (por ejemplo, cenizas de biomasa), reinversiones en maquinaria, transporte;
- **Procesos de productos obsoletos:** Incineración de residuos y procedimientos de eliminación de residuos (se da cuenta del material que deja el sistema para entrar en nuevos ciclos de vida, pero no se incluye ninguna carga medioambiental);
- **Infraestructura de soporte:** Construcción, deconstrucción y reinversiones en las instalaciones de los proveedores;
- **Infraestructura de transmisión/distribución:** Construcción/reconstrucción y mantenimiento de las redes de transmisión/distribución;
- **Transmisión/distribución al cliente:** Pérdidas en redes de energía de alto, medio y bajo voltaje.

En la literatura publicada, lo más corriente es que se incluyan solo las etapas hasta la fase de producción de electricidad. Por lo tanto no se pueden hacer comparaciones significativas para las otras etapas. Específicamente, el punto de vista del uso final no puede ser evaluado en su totalidad si las etapas de transmisión y distribución no están incluidas en el estudio. Generalmente la infraestructura también queda fuera de los estudios.

En este informe, se han utilizado únicamente datos publicados para realizar las comparaciones. Como resultado, hay muchas lagunas en las tablas. Estas lagunas no deben ser interpretadas como la no existencia de emisiones; por el contrario, indican que no existen datos en el estudio específico.

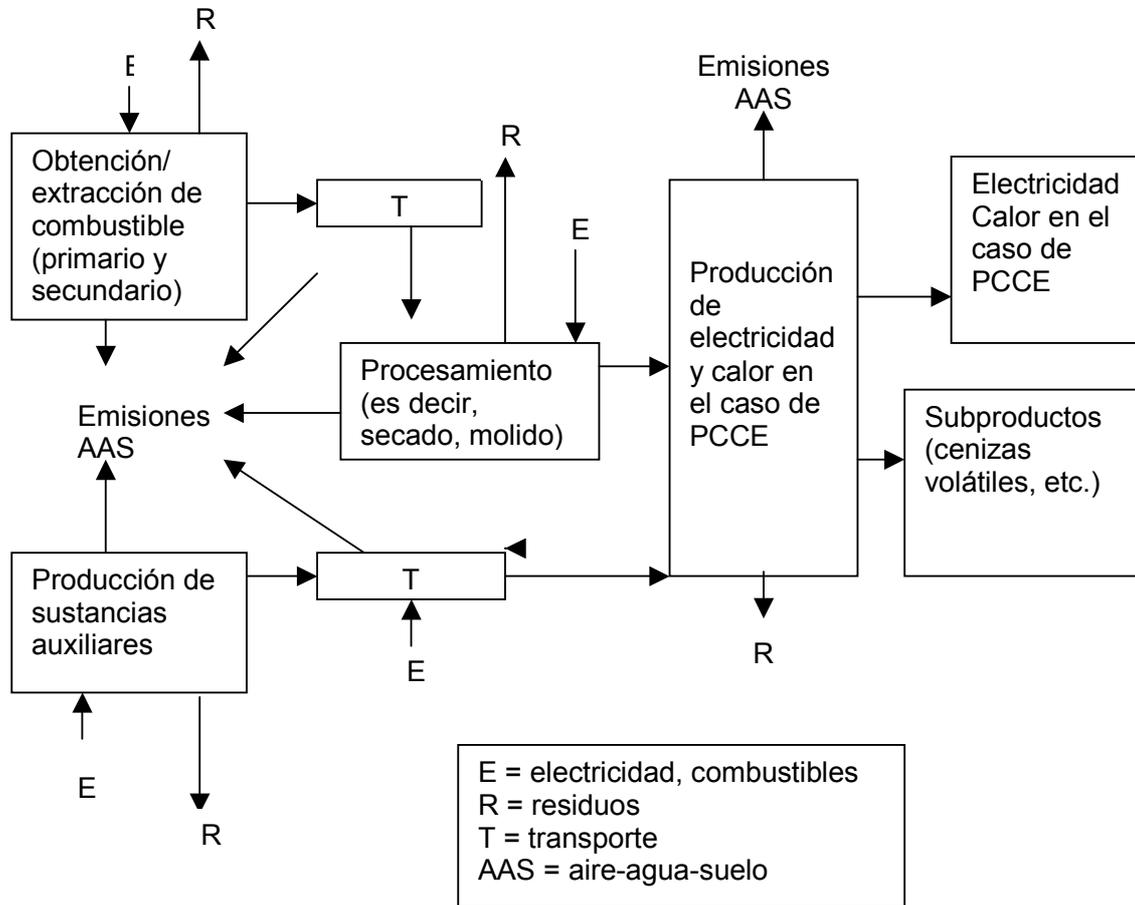


Figura 4.2. Ilustración del alcance del ciclo de vida de la generación de electricidad y los sistemas de cogeneración de electricidad y calor adaptados de Setterwall, et al [Ref 4.4]

Referencias para el Capítulo 4

- 4.1. Organización Internacional de Normalización. *ISO 14020 – Etiquetado Ambiental.*
- 4.2. -----. *ISO 14031 – Evaluación del Desempeño Ambiental.*
- 4.3. *What is EPD?* Ver: <http://www.environdec.com/>
- 4.4. Setterwall, C., Münter, M., Sarközi, P. & Bodlund, B. *Directrices Metodológicas. Informe Final.* ECLIPSE: 2004. Ver: http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html

5. ANTECEDENTES PARA LOS ESTUDIOS SOBRE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

5.1. Historia de la Energía Eléctrica y el Transporte

La construcción de un motor a vapor rotativo en 1781 por parte de James Watt puede considerarse el punto de partida para la Revolución Industrial. Por primera vez en la historia, el hombre tenía a su disposición un medio de hacer trabajos mecánicos en cualquier momento y en cualquier lugar sin tener que recurrir a la fuerza muscular. Las alternativas previas, la rueda hidráulica y el molino de viento, estaban disponibles sólo en ciertos lugares o en ciertos momentos. Los molinos que utilizaban la energía cinética del agua corriente tenían que ubicarse junto a los ríos, y los molinos de viento podían utilizarse solamente cuando la velocidad del viento era lo suficientemente elevada como para hacer girar las piedras de molino.

En 1807, Robert Fulton lanzó el primer buque de vapor comercialmente exitoso, y en 1815, George Stephenson construyó la primera locomotora a vapor. Los motores a vapor también se utilizaban para hacer funcionar máquinas industriales, aunque la turbina hidráulica construida por James Francis en 1855 era una alternativa viable para los sitios ribereños. Sin embargo, el movimiento rotativo tenía que ser transmitido a las máquinas mediante un sistema de engranajes, ejes, correas y poleas.

Michael Faraday descubrió el efecto de la inducción electromagnética en 1831, y en 1837, Thomas Davenport construyó el primer motor eléctrico que funcionaba con corriente directa proveniente de una celda galvánica. En 1881, Thomas Edison comenzó la fabricación de generadores eléctricos. Sus primeros generadores eran impulsados por motores a vapor. En 1888, Gustav de Laval construyó la primera turbina de vapor, que posteriormente reemplazó el motor a vapor como fuerza motriz para los generadores.

En 1882, comenzó a funcionar la primera central hidroeléctrica del mundo en Appleton, Wisconsin (EE.UU.). Esta central energética era del tipo de agua fluyente. Unos pocos años más tarde, se construyeron represas para crear áreas artificiales de almacenamiento del agua y para controlar el flujo del agua.

La ventaja de la electricidad era que las líneas de transmisión de alto voltaje podían utilizarse para transferir energía a lo largo de grandes distancias con pocas pérdidas. Este hecho hizo posible producir electricidad donde estaba disponible a un menor costo, por ejemplo, en los rápidos o en minas de carbón, y utilizarla donde fuera necesario. Los primeros artefactos eléctricos fueron los focos y los motores eléctricos, pero se siguen inventando nuevas aplicaciones.

En 1876, Nikolaus August Otto construyó el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos de ciclo de pistón que funcionaba con combustible líquido. Gottfried Daimler y Karl Benz construyeron los primeros automóviles prácticos utilizando el motor de Otto en 1886, y en 1893, Rudolf Diesel desarrolló el primer motor de combustión interna que podía funcionar sin encendido por bujías. El primer pozo de petróleo moderno fue perforado en Baku en 1848. Al año siguiente, Abraham Gesner destiló kerosén del petróleo crudo. Michail Dietz inventó la lámpara de kerosén en 1857. El refinado de petróleo crudo comenzó en los EE.UU. alrededor de 1860. La gasolina se convirtió en el principal producto del petróleo después de que Henry Ford comenzó la producción en serie de automóviles en 1908.

Cuando se extrae gasolina, gasoil y otros destilados livianos y medios del petróleo crudo, el producto restante se utiliza para producir fuel oil pesado y betún. El fuel oil pesado se utiliza como fuente de energía para procesos industriales y para centrales energéticas alimentadas a petróleo.

En 1858, se construyó el primer conducto de gas natural en Pennsylvania (EE.UU.). El gas se utilizaba como combustible para el alumbrado público. Después de la Segunda Guerra Mundial, se construyeron extensas redes de conductos de gas natural en América, Europa y Asia.

Hasta la década de 1950, la energía hidroeléctrica y las centrales energéticas alimentadas a carbón o a petróleo producían prácticamente toda la electricidad. La primera central comercial de energía nuclear comenzó a funcionar en 1957.

5.2. Cooperación Internacional para Controlar las Emisiones

En diciembre de 1952, se registraron alrededor de 4.000 víctimas extra en el Gran Londres durante una niebla de cuatro días de duración. El humo del carbón proveniente de los hogares a leña, las centrales energéticas y las fábricas quedó atrapado encima de la ciudad, dando como resultado una concentración de contaminantes del aire excepcionalmente elevada. Anteriormente habían ocurrido episodios similares de contaminación en regiones industriales (valle de la Meuse, Bélgica, en 1930 y Donora, Pennsylvania, EE.UU., en 1948) con un pequeño número de víctimas, pero con una gran proporción de población que sufrió problemas de salud (43% en Donora). En diciembre de 1961, ocurrió un episodio similar en el Gran Londres, con 700 víctimas.

El significativo aumento en la morbilidad y la mortalidad durante los episodios de contaminación:

- dejó pocas dudas acerca de la causalidad en cuanto a la inducción de serios efectos en la salud causados por concentraciones muy elevadas de la mezcla de contaminantes del aire cargado de partículas;
- estimuló el establecimiento de redes de control del aire en las principales áreas urbanas y medidas de control para reducir la contaminación del aire;
- estimuló la investigación para identificar los agentes causantes claves que contribuyen a los efectos de contaminación del aire urbano y para caracterizar las relaciones exposición-respuesta asociadas [Ref. 5.1].

La solución inmediata fue prohibir el uso de carbón de bajo grado con alto contenido de cenizas para calefacción. Luego, se hizo más eficiente el control de emisiones de partículas en las centrales energéticas. Una medida efectiva para mejorar la calidad del aire urbano fue construir chimeneas más altas.

En la década de 1960, los científicos observaron una relación entre las emisiones de azufre en Europa continental y la acidificación de los sistemas lacustres y fluviales en Escandinavia. El dióxido de azufre emitido se oxidaba en la atmósfera y convertía el agua de lluvia en ácido sulfúrico diluido. Este fenómeno se llama lluvia ácida. En los años posteriores, se hallaron más pruebas de que los contaminantes del aire podían causar daños a cientos de kilómetros del punto de emisión. Este nuevo tipo de desafío a la

cooperación internacional condujo en 1979 a la firma de la Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia bajo los auspicios de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.

Las actividades de la Convención inicialmente se centraron en la reducción de los efectos de la lluvia ácida mediante el control de las emisiones de azufre. El Protocolo sobre la Reducción de las Emisiones de Azufre, firmado en 1985, estableció compromisos para que las partes redujeran las emisiones anuales de azufre en al menos 30% desde los niveles de 1980 tan pronto como fuera posible pero poniendo como límite el año 1993. Para el año 1995, diecinueve partes que habían ratificado el Protocolo habían logrado reducciones superiores al 50%. El segundo Protocolo del Azufre, firmado en 1994, se basaba en el concepto de "cargas críticas", asignando a cada país un objetivo de reducción basado en los efectos de sus emisiones de azufre sobre los ecosistemas de la región.

Las emisiones de óxido de nitrógeno también contribuyen a la lluvia ácida, pero en menor grado que las emisiones de óxido de azufre. Los óxidos de nitrógeno, junto con los compuestos orgánicos volátiles, también son los precursores del ozono y de otros componentes del smog estival. En 1988 se firmó el Protocolo para el Control de las Emisiones de Óxidos de Nitrógeno, y entró en vigencia en 1991. Las partes se vieron obligadas a limitar sus emisiones de óxido de nitrógeno a los niveles de 1987 (el año base para los EE.UU. era 1978) para fines de 1994 y a aplicar la mejor tecnología disponible a las nuevas fuentes estacionarias y móviles principales. De las 25 partes del Protocolo, diecinueve han reducido sus emisiones a niveles inferiores a los de 1987 o se han estabilizado en esos niveles.

Las principales fuentes de compuestos orgánicos volátiles (COV) incluyen la combustión incompleta de los carburantes y los usos industriales de ciertas pinturas, colas y tintas. En 1991 se firmó el Protocolo para el Control de las Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles y entró en vigencia en 1997. El Protocolo requería que las partes redujeran sus emisiones de COV en al menos un 30% para 1999, utilizando como año base el año 1988 o cualquier año entre 1984 y 1990.

En 1999 se redactó un Protocolo sobre óxidos de nitrógeno y sustancias relacionadas. Este Protocolo se centra en la acidificación, eutrofización y los efectos del ozono troposférico sobre los cultivos, los bosques y la salud humana. Este Protocolo sobre múltiples contaminantes multiefecto aún no ha entrado en vigencia, pero ya hay muchos países que lo cumplen [Ref. 5.2].

Las pruebas de la interferencia humana en el clima surgieron por primera vez en 1979 en la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima. En 1988, se estableció el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático para presentar y evaluar la información científica sobre el tema. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático se abrió a la firma en 1992 y entró en vigencia en 1994. En 1997, la Conferencia de las Partes para la Convención Climática elaboró un borrador de un primer Protocolo para el control de las emisiones. Este Protocolo otorga cuotas de emisiones a los países industrializados; los países en desarrollo no tienen dichas cuotas. El Protocolo se firmó en 1997 en Kyoto. El Protocolo de Kyoto también incluye una lista de gases y actividades sobre las que se imponen limitaciones y define brevemente los mecanismos que pueden utilizarse para conseguir cuotas nacionales.

Las negociaciones para complementar las reglas en el Protocolo de Kyoto se suspendieron en La Haya en 2000 pero se retomaron en Bonn en 2001. Las reglas aprobadas en Bonn se adoptaron unos meses más tarde en Marrakech. Aunque los EE.UU se retiraron del Protocolo, los otros países llegaron a un acuerdo a nivel político sobre todas las cuestiones (Acuerdos de Marrakech). El Protocolo entrará en vigencia si es ratificado por al menos 55 países y a condición de que sus emisiones cubran más del 55% de las emisiones de los países industrializados. A partir de abril de 2004, 64 países han ratificado el Protocolo, y 58 países lo han aprobado o han accedido al mismo. Sin embargo, las emisiones totales de los países industriales que han ratificado el Protocolo ascienden a sólo 44,2% [Ref. 5.3].

Las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático resultante actualmente son considerados el problema ambiental más crucial. Este es un problema mundial, dado que depende de las emisiones mundiales totales. Su causa principal son las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) resultantes del uso de combustibles fósiles. La deforestación de las áreas tropicales contribuye 10-20% a las emisiones mundiales de CO₂. Otras emisiones, principalmente metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), contribuyen alrededor del 20% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero. En este cálculo, las emisiones de estos gases se han convertido a emisiones equivalentes de CO₂ utilizando factores de conversión propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en 1996 [Ref. 5.4].

5.3. Materia Particulada

El término materia particulada (MP) es equivalente al término aerosol atmosférico y define una suspensión de partículas sólidas atmosféricas y/o gotitas de varios tamaños. El tamaño y la composición química son consideradas las características más importantes de dichas partículas, mientras que la superficie total y posiblemente la cantidad de partículas también pueden ser importantes. Una sola partícula generalmente contiene una mezcla de componentes químicos y físicos (sólidos, líquidos). La concentración PM₁₀ es la unidad de masa por volumen (µg/m³) de partículas con un diámetro aerodinámico de menos de 10 micrómetros (µm). Las partículas más grandes contenidas en la fracción de tamaño PM₁₀ alcanzan la parte superior del pulmón. Las partículas más pequeñas de esta fracción de tamaño (en particular PM_{2,5} y PM_{1,0}, con diámetros menores a 2,5 y 1,0 µm) penetran más profundamente en los pulmones y llegan a la región alveolar. A menudo la MP se diferencia por los componentes químicos (por ejemplo, sulfatos, metales pesados y orgánicos), al igual que por los componentes relacionados con la fuente (por ejemplo, hollín del gasoil). Actualmente, es una práctica común indicar el PM_{2,5} como la "fracción fina" y las partículas con diámetros entre 2,5 y 10 µm (PM_{2,5-10}) como la "fracción gruesa".

Las partículas grandes o muy pequeñas tienen un tiempo de residencia atmosférica limitado debido a la deposición o a la coagulación. Las partículas cuyo tamaño va de aproximadamente 0,1 a unos pocos µm permanecen en la atmósfera mucho más tiempo (generalmente de varios días a una semana) y en consecuencia pueden ser transportadas a grandes distancias (1.000 kilómetros o más).

La MP se emite directamente de fuentes "primarias" (MP primaria) y también se forma en la atmósfera por la reacción de los gases precursores (MP secundaria). Otras distinciones comunes son las fuentes naturales/antropogénicas y fuentes de combustión/no

combustión. Los cálculos de emisión provenientes de fuentes de no combustión tienen un alto grado de incertidumbre.

Una gran cantidad de nuevas pruebas científicas que surgieron en la última década fortalecieron el lazo entre la exposición a las MP del ambiente y los efectos sanitarios. Nuevos análisis han demostrado que, con las concentraciones actuales de MP en Europa, la muerte por causas tales como enfermedades cardiovasculares y pulmonares está avanzando en al menos unos meses sobre la población, en promedio. Además, hay fuertes asociaciones entre la MP ambiental y el aumento de los síntomas del tracto respiratorio inferior y la reducción del funcionamiento pulmonar en los niños y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y el reducido funcionamiento pulmonar en los adultos. No hay pruebas de un umbral debajo del cual la MP no tenga ningún efecto sanitario. No ha sido posible establecer una relación causal entre los efectos sanitarios relacionados con la MP y un único componente de la MP. Las características de la MP que han sido probadas como contribuyentes a la toxicidad incluyen el contenido de metal, la presencia de hidrocarburos aromáticos de ciclo múltiple y otros componentes orgánicos; contenido de endotóxicos y tamaño pequeño (menor de 2,5 μm) y extremadamente pequeño (menos de 0,1 μm).

Los estudios epidemiológicos sugieren que una cantidad de fuentes de emisiones están asociadas a efectos de salud, especialmente los vehículos automóviles y la combustión del carbón. Los estudios toxicológicos demuestran que las partículas que se originan en los motores de combustión interna, quema de carbón, combustión de petróleo residual y quema de madera tienen un alto potencial inflamante [Ref. 5.5].

5.4. Emisiones de sustancias radiactivas e impactos radiológicos

Con la excepción de las emisiones térmicas y el agotamiento de los recursos, los impactos ambientales y sanitarios más significativos del ciclo de combustible nuclear difieren drásticamente de los impactos causados por otras fuentes de energía (ver Tabla 7.2). El denominador común de los impactos públicos y ocupacionales de la producción de energía nuclear está relacionado con la emisión de sustancias radiactivas y los resultantes impactos radiológicos. El uso de energía nuclear y otras actividades relacionadas con la radiación están controlados por los requisitos sobre la protección contra las radiaciones. La Comisión Internacional sobre Protección Radiológica (ICRP) emite recomendaciones para la protección de las personas de los efectos nocivos de la radiación ionizante [Ref. 5.6]. Las autoridades nacionales de regulación han desarrollado sistemas regulatorios que generalmente siguen las líneas generales de las recomendaciones de la ICRP. El sistema de protección radiológica recomendado por la ICRP tiene los siguientes principios esenciales:

- (1) Justificación general de una práctica;
- (2) Las exposiciones recibidas deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible;
- (3) Se deben tomar en cuenta factores económicos y sociales;
- (4) La exposición de los individuos debe estar sujeta a límites de dosis.

Los principales indicadores de impacto considerados en los análisis de la totalidad de la cadena energética de la energía nuclear, por ejemplo, en los estudios ExternE [Ref. 5.7], son las exposiciones a la radiación pública y ocupacional. Las exposiciones públicas se evalúan tanto como exposiciones anuales individuales como en su calidad de

compromisos de dosis colectivas. Según la definición, la última es un integral mundial a lo largo de un intervalo de tiempo especificado. En los estudios del UNSCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Ionizantes) y de ExternE, se han utilizado tiempos de integración muy prolongados (10^4 o 10^5 a). La tendencia reciente, sin embargo, es truncar la integración a un período más corto (500 a tal como se señala en la Ref. 5.10). Los principales resultados de este reciente estudio realizado por la OCDE se reproducen en la Tabla 5.1.

Las exposiciones a la radiación proveniente del ciclo de combustible nuclear se deben parcialmente a las exposiciones a la radiación natural aumentadas en el extremo delantero del ciclo de combustible (es decir, extracción y procesamiento de uranio y el enriquecimiento) y parcialmente debido a radionucleidos producidos durante la operación de la central de energía nuclear. Un modo de poner en perspectiva los impactos de la cadena de producción de energía nuclear es compararlos con otras fuentes de exposición a la radiación. Surge la Figura 5.1, basada en los resultados presentados en los informes de la UNSCEAR [Refs. 5.8, 5.9].

Tabla 5.1 Resumen de los cálculos de dosis para el público y los trabajadores provenientes de las principales etapas del ciclo del combustible [Ref. 5.10]

Etapas del ciclo de combustible	Público (cálculos genéricos)			Trabajadores (datos operativos)	
	Dosis colectiva truncada a 500 años (hombreSv/GWa)		Promedio anual de dosis individual para el grupo crítico (hombreSv/a)	Dosis colectiva anual (hombreSv/GWa)	
	Paso único	Reprocesamiento		Paso único	Reprocesamiento
Explotación minera y molienda	1,0	0,8	0,30-0,50	0,02-0,18	0,016-0,14
Conversión y enriquecimiento del combustible	0,0009		0,020	0,008-0,02	0,006-0,016
Fabricación de combustible				0,07	0,094
Generación de energía	0,6	0,6	0,0005-0,0008	1,0-2,7	1,0-2,7
Reelaboración, vitrificación	No aplicable	1,2	0,40	No aplicable	0,014
Transporte	Mínimo	Mínimo	Mínimo	0,005-0,02	0,005-0,03

Eliminación de desechos	(*)	(*)	(*)	Mínimo	Mínimo
Total	1,6	2,6	No aplicable	1,04-2,93	1,14-2,99

(*) Sin emisiones durante los primeros 500 a

Exposición pública sumada, compromiso de dosis colectiva mundial (hombreSv) causada por diferentes prácticas durante 50 años

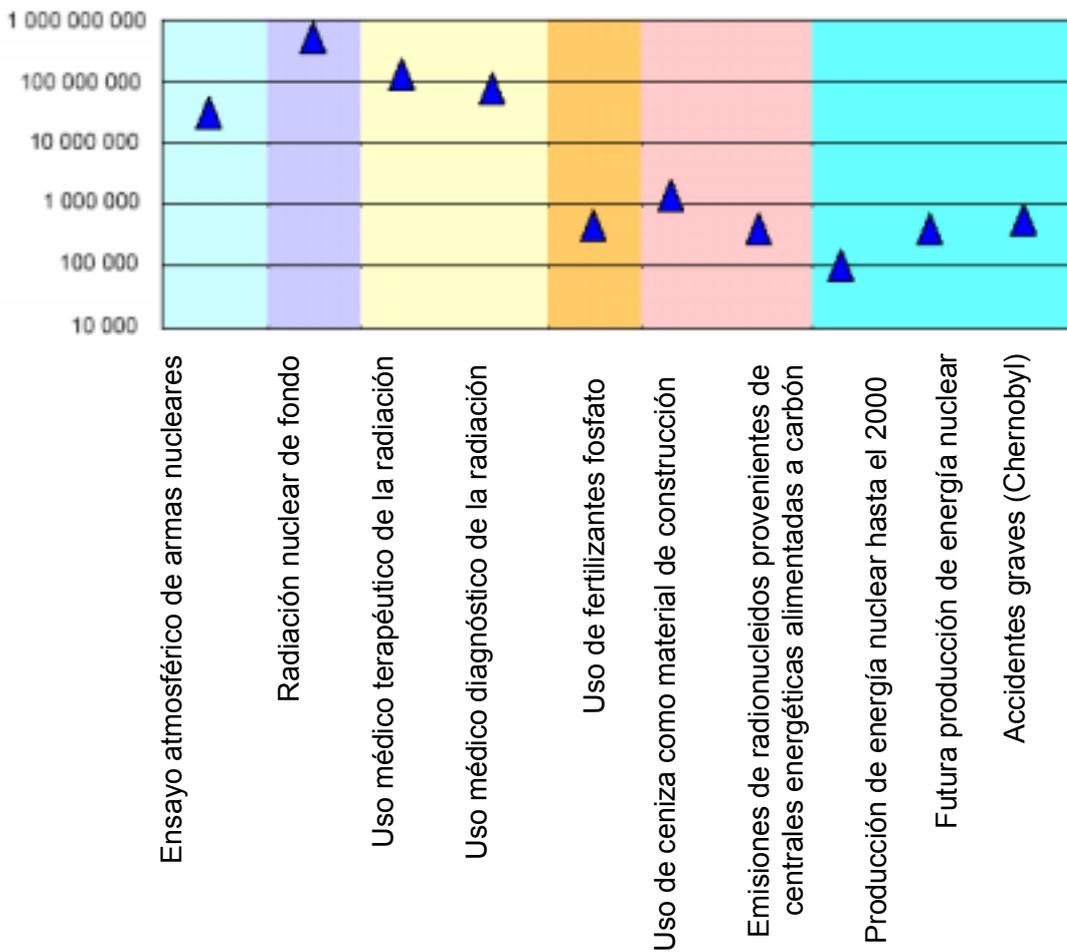


Figura 5.1. Comparación de las exposiciones públicas a la radiación (hombreSv) causadas por diferentes prácticas o actividades/eventos derivados de los datos en [Refs. 5.8, 5.9]

Referencias para el Capítulo 5

- 5.1. Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. *Criterios de Calidad del Aire para Materia Particulada*. Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU.: Research Triangle Park, NC. 1996. Pp. 12-28–12-29. (EPA 600/P-95/001aF).
- 5.2. *Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia*. Ver <http://www.unece.org/env/lrtap/>
- 5.3. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ver <http://www.unfccc.int/>
- 5.4. VTT Energy. *Energy Visions 2030*. VTT Energy, Edita, Helsinki: 2001. 237 p. ISBN 951-37-3596-6.
- 5.5. CAFE Grupo de Trabajo sobre Materia Particulada. *Second Position Paper on Particulate Matter –Final Draft (April 6th, 2004)*. CAFE Grupo de Trabajo sobre Materia Particulada.http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf
- 5.6. *1990 Recomendaciones de la Comisión Internacional sobre Protección Radiológica*, ICRP Publicación 60, Anales de la ICRP, 21, Nos. 1-3, Pergamon Press: Oxford.
- 5.7. Dreicer, M., Tort, V. *ExternE – Externalidades de la Energía - Nuclear*. Informe de la CE, EUR 16524 EN, 1995, Vol. 5, 337 p.
- 5.8. UNSCEAR 1993. Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Ionizantes. *Fuentes y Efectos de la Radiación Ionizante. Informe a la Asamblea General con Anexos Científicos*. Naciones Unidas: Nueva York. 1993. 922 p.
- 5.9. UNSCEAR 2000. Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Ionizantes (UNSCEAR). *Fuentes y Efectos de la Radiación Ionizante. Informe a la Asamblea General con Anexos Científicos*. Naciones Unidas: Nueva York. 2000. Volumen I: Fuentes, 654 p. Volumen II: Efectos, 566 p.
- 5.10. Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). *Impactos Radiológicos de las Opciones de Gestión del Combustible Nuclear Utilizado. Estudio Comparativo*. OCDE: Paris. 2000. 122 p.

6. EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA

6.1. Evaluación Comparativa de Fuentes Alternativas de Energía

En la década de 1970, se realizaron una serie de evaluaciones para comparar las fuentes de energía alternativa sobre la base de los efectos sanitarios públicos y laborales de la producción provenientes de una cierta cantidad de energía eléctrica (1 GWh). Las evaluaciones consideraban los ciclos de combustible completos abarcando la extracción, preparación y transporte de combustible y generación de electricidad. Los ciclos de combustible considerados fueron uranio, carbón y petróleo. Los efectos sanitarios se evaluaron sobre la base de una cantidad de muertes por accidentes y enfermedades al igual que sobre casos de enfermedades por GWh de energía eléctrica.

Después de la primera crisis petrolera en 1972, muchos países industrializados se propusieron buscar otras fuentes de energía que no fueran el petróleo. En particular, aquellos países con pocos o ningún recurso de energía fósil han desarrollado y aprovechado las fuentes de energía renovable, principalmente biomasa y eólica. Muchos países industrializados ya han aprovechado la mayor parte de sus recursos hidroeléctricos, pero la energía hidroeléctrica sigue siendo una fuente viable de energía renovable en muchos países en desarrollo. El desarrollo de células solares y de celdas de combustible ha sido impulsado por la necesidad de contar con fuentes de electricidad para la tecnología espacial.

Se han adoptado diferentes enfoques para respaldar la toma de decisiones sobre asuntos relacionados con la energía y el medio ambiente. Un modo de combinar diferentes impactos medioambientales de la energía es evaluar los llamados costos externos o externalidades. Estos se definen como los costos que no están incluidos en el precio de la energía. Muchos impactos de la producción de energía sobre el medio ambiente incluyen dichos costos para la sociedad. En principio, la sociedad puede incluir (internalizar) algunos de los costos externos en el precio de la energía, por ejemplo imponiendo impuestos. En la práctica, sin embargo, puede ser difícil evaluar los costos ya que el conocimiento de muchos impactos medioambientales es limitado, los impactos pueden tener lugar sólo después de un largo tiempo o los valores o recursos naturales no tienen valores de mercado.

El estudio más exhaustivo sobre costos externos que se ha realizado hasta el momento ha sido el Proyecto de Investigación de la Comisión Europea ExternE (Externalidades de la Energía). El proyecto fue realizado por investigadores de todos los Estados Miembros de la UE (excluyendo Luxemburgo), Noruega y los EE.UU. La metodología utilizada para calcular los costos externos se llama metodología del camino del impacto. Esta metodología comienza con la medición de las emisiones. Luego se controla la dispersión de contaminantes en el medio ambiente y el posterior incremento en las concentraciones ambientales. Después de eso, se evalúa el impacto sobre asuntos tales como el rendimiento de las cosechas o la salud. La metodología concluye con una evaluación del costo resultante [Ref. 6.1].

Dentro del Programa de Investigación y Desarrollo Joule II de la Comisión Europea, el Proyecto ExternE ha desarrollado y demostrado una metodología unificada para la cuantificación de las externalidades de diferentes tecnologías de generación de energía. Fue lanzado en 1991 como el Estudio de Ciclos de Combustible de la CE-EE.UU y

continuó de 1993 a 1995 como el Proyecto ExternE. En este proyecto, la metodología se aplicó para seleccionar estudios de casos que representaban el carbón, el lignito, el petróleo, el gas, la energía nuclear, la energía hidroeléctrica y la energía eólica. Junto con otros proyectos, el trabajo continuó de 1996 a 1998 como el Proyecto de Implementación Nacional ExternE. Este proyecto generó más de 60 estudios de casos provenientes de quince países y doce cadenas de combustible. Las nuevas cadenas de combustible consideradas en el Proyecto de Implementación nacional fueron:

- energía hidroeléctrica;
- orimulsión (mezcla de betún y agua, reemplazando el fuel oil pesado);
- incineración de residuos;
- turba;
- biomasa: gasificación del cultivo energético;
- biomasa: gasificación de residuos agrícolas;
- biomasa: combustión de residuos forestales o de escamondadura.

El objetivo original del proyecto fue recopilar un amplio conjunto de datos que pudieran ser utilizados para analizar una gama de asuntos, incluyendo:

- internalización de los costos externos de la energía;
- optimización de los procesos de selección de sitios;
- análisis costo-beneficio de las medidas para la eliminación de la contaminación;
- evaluación comparativa de ciertos sistemas energéticos.

La evaluación del ciclo de vida también ha sido utilizada para evaluar diferentes sistemas energéticos desde un punto de vista medioambiental. La ECV tiene como objetivo explicar todos los flujos materiales, directos o indirectos, inducidos por un ciclo energético. Dado que los flujos inducidos tienen lugar en muchos puntos geográficos diferentes bajo una variedad de diferentes condiciones, no es factible modelar el destino de todas las emisiones. Generalmente se evalúa sólo el total de las emisiones de gases de efecto invernadero u otros contaminantes. Este método también se llama evaluación de las emisiones del ciclo de vida. Este enfoque puede justificarse por los gases de efecto invernadero y otros contaminantes con prolongados tiempos de residencia en la atmósfera. Sin embargo, para el anhídrido sulfuroso, los óxidos de nitrógeno, el ozono y las partículas este enfoque no es satisfactorio [Ref. 6.11].

El objetivo del programa de investigación de la Unión Europea, ECLIPSE (Inventarios ambientales y ecológicos del ciclo de vida para los sistemas energéticos actuales y futuros en Europa), fue proporcionarle a los usuarios potenciales:

- un marco metodológico coherente, incluyendo directrices metodológicas dependientes de la aplicación y requisitos de formato de datos relacionados con la cuantificación de los impactos ambientales provenientes de sistemas energéticos nuevos y descentralizados en Europa, basadas en un enfoque de ciclo de vida;
- un conjunto armonizado de datos de ICV públicos, coherentes, transparentes y actualizados sobre sistemas energéticos nuevos y descentralizados; el trabajo abarcó alrededor de 100 configuraciones diferentes de tecnologías fotovoltaicas, turbinas eólicas, celdas de combustible, biomasa y producción combinada de calor y electricidad alimentada con biocombustible (PCCE) [Ref 6.2].

El informe *Energía hidroeléctrica y medio ambiente* [Ref. 6.3] presenta un resumen de las evaluaciones del ciclo de vida de los sistemas energéticos presentadas entre 1992 y 1998. Los sistemas energéticos se agrupan en tres categorías según su capacidad de responder a las fluctuaciones en la demanda de energía eléctrica:

1. Sistemas capaces de satisfacer la carga base y pico:

- Energía hidroeléctrica con embalse
- Diesel

2. Opciones de carga base con flexibilidad limitada:

- Energía hidroeléctrica, central de agua fluyente
- Carbón
- Lignito
- Fuel oil pesado
- Nuclear
- Turbinas de gas de ciclo combinado
- Celdas de combustible grandes
- Biomasa: plantación energética
- Biomasa: combustión de residuos forestales

3. Opciones intermitentes que necesitan producción de soporte:

- Energía eólica
- Solar fotovoltaica

En los EE.UU., el Laboratorio Nacional de Energía Renovable ha realizado una serie de análisis del ciclo de vida para comparar la combustión de los combustibles fósiles y de la biomasa. El efecto de la captura de dióxido de carbono proveniente de gases de combustión y su secuestro en vertederos subterráneos también ha sido considerado. Se han estudiado los siguientes sistemas energéticos [Ref. 6.8]:

- Carbón
- Ciclo combinado con gas natural
- Ciclo combinado de plantación de árboles y gasificación de biomasa
- Los sistemas previos con secuestro de dióxido de carbono

La Universidad de Wisconsin ha realizado análisis del ciclo de vida para ciclo combinado con gas natural, solar fotovoltaica, energía eólica y nuclear [Refs. 6.32, 6.44, 6.45].

El proyecto de investigación australiano *Carbón en una sociedad sustentable* [Ref. 6.34] consideraba, entre otros, los siguientes sistemas energéticos:

- Lignito, alimentación pulverizada
- Carbón, alimentación pulverizada
- Carbón, ciclo combinado de combustión lecho fluidificado
- Carbón, gasificación integrada en ciclo combinado
- Carbón, gasificación integrada en ciclo combinado, recuperación de CO₂
- Gasificación del carbón, donde el hidrógeno producido acciona una celda de combustible de óxido sólido
- Ciclo combinado con gas natural
- Ciclo combinado de plantación de árboles y gasificación de biomasa

- Solar fotovoltaica
- Energía eólica
- Energía nuclear

En las siguientes secciones, se presentan los resultados de recientes estudios de evaluación de ciclo de vida en forma de tablas y gráficos. Se han utilizado solo estudios originales como material fuente para asegurarse de que todos los datos pueden ser rastreados hasta las referencias originales. Los estudios originales sobre sistemas de generación de electricidad (Secciones 6.2 y 6.3) fueron publicados entre 1996 y 2004. Sin embargo, no están incluidos en la publicación *Energía hidroeléctrica y medio ambiente* [Ref. 6.3]. Los estudios sobre producción combinada de calor y electricidad (Sección 6.4) fueron publicados entre 1997 y 2004. Existen menos estudios sobre evaluación de ciclo de vida de calefacción de locales que sobre electricidad; dos de ellos son analizados en la Sección 6.5. La Sección 6.6 analiza solo dos estudios de evaluación del ciclo de vida del transporte. Estos estudios fueron publicados en el 2002 y 2004 respectivamente.

6.2. Electricidad proveniente de ciclos de combustión de combustibles fósiles

La Tabla 6.1 es un resumen de las emisiones de ciclo de vida para ciclos de combustibles basados en la combustión de combustibles fósiles. Los datos de emisión han sido extraídos de los estudios del Laboratorio Nacional de Energía Renovable [Refs. 6.5–6.8], los informes del Proyecto de Implementación Nacional ExternE [Refs. 6.9–6.20], el folleto Vattenfall [Ref. 6.21], la tesis de Maier [Ref. 6.32] y el informe sobre *Carbón en una sociedad sustentable* [Ref. 6.34]. Se brindan los sitios de las centrales energéticas existentes. Sin embargo, se realizan varios análisis para futuras o hipotéticas centrales energéticas. En dichos casos, solo se brinda el nombre del país. Otros datos provistos para cada central energética son la capacidad eléctrica neta, el factor de carga (la relación entre las horas de carga total y las horas totales en un año en porcentaje) y la eficiencia térmica neta.

Para cada ciclo de combustible, las emisiones totales de gases de efecto invernadero se expresan como toneladas de equivalente de CO₂ por 1 GWh de electricidad producida. Las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) han sido convertidas a emisiones de CO₂ equivalentes con los factores de conversión (21 para CH₄ y 310 para N₂O) propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en 1996. Las emisiones totales de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas han sido expresadas como kg/GWh.

La central energética australiana alimentada a lignito en Loy Yang no tiene ningún equipo para reducir las emisiones de dióxido de azufre. La central energética griega alimentada a lignito en Agios Dimitrios utiliza ceniza de lignito para la desulfuración de los gases de combustión (FGD). Las emisiones de dióxido de azufre varían debido a varios parámetros incontrolables del sistema. La central energética alemana de Grevenbroich utiliza desulfuración de gases de combustión. Estas centrales energéticas están ubicadas cerca de minas de lignito a cielo abierto.

La central energética australiana alimentada a carbón pulverizado de Bayswater tiene control de emisión de partículas (filtros de tela) pero ningún control de las emisiones de dióxido de azufre o de óxidos de nitrógeno. Todas las otras centrales energéticas alimentadas a carbón existentes o hipotéticas que figuran en la Tabla 6.1 tienen tecnologías de control eficientes para las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de

nitrógeno y partículas. Las centrales energéticas alimentadas a carbón pulverizado están equipadas con desulfuración de los gases de combustión. La emisión de óxidos de nitrógeno está controlada ya sea por quemadores de bajo NO_x o reducción catalítica selectiva (SCR). El proceso de óxido de cobre (CuO) quita tanto el dióxido de azufre como los óxidos de nitrógeno de los gases de combustión. Otros procesos de combustión evaluados son la combustión de lecho fluido atmosférico (AFBC), combustión en lecho fluido a presión (CLFP) y ciclo combinado con gasificación integrada (CCGI). Para el control de partículas se utilizan precipitadores electrostáticos o filtros de tela.

En la central hipotética de los EE.UU. con secuestro de dióxido de carbono, el 90% del CO₂ se captura del gas de combustión mediante absorción química y es transportado por una cañería de 300 km de largo hasta un vertedero subterráneo. En la central australiana hipotética con CGCI y recuperación de dióxido de carbono, el 90% del CO₂ se captura, comprime y arroja en acuíferos profundos en el mar.

Las centrales energéticas alimentadas a petróleo pesado en la Tabla 6.1 presentan emisiones de dióxido de azufre variadas, dependiendo del contenido de azufre del combustible. La desulfuración de los gases de combustión está instalada únicamente en la central hipotética británica con ciclo combinado. Todas las centrales energéticas existentes en la Tabla 6.1 tienen quemadores de bajo NO_x.

Todas las centrales energéticas de ciclo combinado con gas natural en la Tabla 6.1 tienen tecnologías de combustión y de control de emisiones similares. La central energética hipotética de los EE.UU. utiliza reducción catalítica selectiva para controlar las emisiones de NO_x. En la central hipotética de los EE.UU. con secuestro de dióxido de carbono, el CO₂ es capturado y transportado del mismo modo que en la central energética hipotética alimentada a carbón.

Tabla 6.1. Electricidad proveniente del ciclo de combustión del combustible fósil

	Capac.	Factor de carga	Eficiencia	Eq. CO ₂	SO ₂	NOx	Partículas	Ref.
	MW			t/GWh	Kg/GWh	Kg/GWh	Kg/GWh	
Lignito								
Loy Yang	2000	88%	31%	1144	2830	2130	113	[6.34]
Grevenbroich, FGD	800	74%	40%	1062	425	790	511	[6.13]
Ag. Dimitiros, FGD	330	68%	37%	1372	890-1574	1054-1106	947	[6.14]
Carbón								
Bayswater	2500	70%	36%	932	3600	2230	81	[6.34]
Australia, CLFP	1000	70%	42%	803	140	540	70	[6.34]
Australia, CCGI	1000	70%	44%	766	150	590	21	[6.34]
Australia, CCGI-CO ₂	1000	70%	36%	130	150	810	28	[6.34]
Australia, H ₂ , SOFC	1000	70%	70%	500	14	79	1	[6.34]
Meri-Pori, FGD, SCR	560	74%	43%	860	820	625	170	[6.11]
Francia, FGD	600	40%	38%	1085	1360	2220	130	[6.12]
Alemania, FGD	600	74%	43%	898	326	560	182	[6.13]
Ámsterdam, FGD	630	72%	44%	980	412	720	17	[6.16]
Pego, FGD	1200	65%	37%	834	794	1892	258	[6.17]
España, FGD	1050	86%	33%	1026	1187	1819	1279	[6.18]
Reino Unido, FGD	1800			960	1100	2200	160	[6.10]
Reino Unido, FGD+SCR	1800			972	1100	700	160	[6.20]
Reino Unido, AFBC	1800			1075	1100	1000	160	[6.20]
Reino Unido, CLFP	1800			1010	1000	500	30	[6.20]
Reino Unido, CCGI	1800			823	200	700	30	[6.20]
EE.UU., bajo NOx	425	60%	35%	959	2500	2350	9800	[6.6]
EE.UU., CuO	404	60%	42%	757	720	540	110	[6.6]
EE.UU.	600			847				[6.8]
EE.UU., sec CO ₂	600			247				[6.8]
Fuel oil pesado								
Cordemais, bajo NOx	700	17%	39%	866	5260	1200	130	[6.12]
Grecia	120	80%	37%	777	3639	1450	311	[6.14]
Monfalcone, bajo NOx	640	57%	40%	774	2160	990	170	[6.15]
Stenungsund, bajo NOx	820	11%		825	620	750		[6.21]
Reino Unido, combi, FGD	528			657	1030	988	16	[6.20]
Ciclo combinado con gas natural								
Australia	624	70%	49%	439	1	1400		[6.34]
Francia	250	68%	52%	433		710		[6.12]
Alemania	778	74%	58%	398	3	277	18	[6.13]
Italia	680	68%	47%	448		460		[6.15]
Eemshaven	1669	75%	55%	421		312	32	[6.16]
Tapada do Outeiro	918	86%	48%	440				[6.17]
España, bajo NOx	624	95%	52%	407	171	259		[6.18]
Suecia	900	86%		440	15			[6.19]
Reino Unido, bajo NOx	652	90%	52%	411		460		[6.20]
EE.UU., SCR	505	80%	49%	499	324	570	133	[6.7]
EE.UU., sec CO ₂	600			245				[6.7]
Cass County	620	75%	48%	469				[6.32]

6.3. Electricidad proveniente de ciclos de renovables y energía nuclear

La Tabla 6.2 es un resumen de las emisiones del ciclo de vida para ciclos de energía nuclear y renovable. Los datos de emisión han sido extraídos del informe *¿Energía benigna?* [Ref. 6.4], estudios del Laboratorio Nacional de Energía Renovable [Refs. 6.5–6.8], informes del Proyecto de Implementación Nacional ExternE [Refs. 6.9–6.20], documentos de la Declaración de Producto Ambiental Vattenfall [Refs. 6.22–6.26], informes del Proyecto ECLIPSE [Refs. 6.27–6.31], las tesis de Maier [Ref. 6.32] y Turkulainen [Ref. 6.33], el informe *Carbón en una sociedad sustentable* [Ref. 6.34] y el folleto de Hydro-Québec [Ref. 6.43]. Los nombres de las centrales nucleares e hidroeléctricas existentes se señalan en la Tabla 6.2. También en la Tabla 6.2, los datos sobre la energía hidroeléctrica en Suecia son promedios de cuatro (río Lule älv) y tres (río Ume älv) centrales que representan los diferentes proyectos en cada río. El complejo canadiense de La Grande abarca nueve centrales.

Una característica común de estas fuentes de energía es que las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos surgen de otras etapas del ciclo de vida que no son la generación de energía. Dichas etapas son: extracción de materia prima, fabricación de componentes, transporte de combustible y materiales y construcción y desmantelamiento de instalaciones. Las emisiones provenientes de estas etapas dependen, entre otros factores, de la matriz nacional de producción de energía eléctrica. En los países donde la mayor parte de la electricidad se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles (por ejemplo, EE.UU. 61%), las emisiones son mayores que en los países donde se utilizan menos combustibles fósiles en la producción de energía (por ejemplo, Suiza, 3%).

Sin embargo, los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano) son emitidos desde los embalses hidroeléctricos debido a la degradación natural de la vegetación y el suelo inundados por parte de microbios. Las emisiones reales varían considerablemente entre proyectos individuales, dependiendo del área inundada, el tipo de vegetación, el tipo de suelo y la temperatura. Además, las emisiones varían con el tiempo. Como resultado, es difícil calcular los valores promedio de emisión. En los grandes proyectos de centrales de pasada los embalses son muy pequeños (o inexistentes) y por lo tanto no originan importantes emisiones de gases de efecto invernadero [Ref. 6.4].

Se supone que no surge ninguna emisión de dióxido de carbono del ciclo de combustible de combustión de la biomasa dado que el carbono contenido en el combustible ha sido absorbido de la atmósfera por plantas vivas. En la hipotética central energética de ciclo combinado de gasificación integrada con secuestro de CO₂, las emisiones estimadas de gases de efecto invernadero del ciclo de combustible son negativas. Esto se debe a que los árboles en la plantación energética pueden absorber dióxido de carbono de la atmósfera, y el CO₂ formado durante la generación de energía es vertido bajo tierra.

Los sistemas fotovoltaicos (FV) en la Tabla 6.2 representan cuatro tecnologías FV: silicio monocristalino, silicio multicristalino, silicio amorfo y cobre-indio-galio y diselenio. El estudio australiano ha sido realizado para una granja solar de 400 kW que consiste de paneles solares que son 50% de silicio amorfo y 50% de silicio multicristalino sostenidos por marcos de acero galvanizado sobre cimientos de hormigón. En otros estudios, los módulos fotovoltaicos se ubican sobre techos inclinados como retrocambio.

Las emisiones del ciclo de vida de la energía eólica dependen de la cantidad de material y trabajo necesario para construir las turbinas eólicas. La cantidad de electricidad producida por una turbina eólica durante su vida también depende del factor de carga de la turbina. Este factor está determinado por las estadísticas eólicas locales y las dimensiones y otras propiedades de la turbina eólica. Sírvase notar que los resultados suecos son promedios de once turbinas eólicas cuyos tamaños van de 0,225 a 1,75 MW y los factores de carga abarcan de 16 a 30%. Varios de los estudios originales fueron realizados en realidad para granjas eólicas que cuentan con una serie de turbinas eólicas. Sin embargo, no se espera que la cantidad de turbinas en una granja eólica afecte en forma significativa las emisiones del ciclo de vida.

Las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de un ciclo de combustible nuclear se deben a la energía basada en combustibles fósiles y a la electricidad necesarias para extraer y procesar el combustible y para la construcción y materiales de las instalaciones del ciclo de combustible. La mayor parte de la energía se consume para enriquecer el contenido del isótopo U-235 en uranio natural. El método de difusión de gas consume alrededor de 40 veces más de electricidad que el método de centrifugación del gas. La cifra más elevada (40 t/GWh) se refiere a un ciclo donde el enriquecimiento se basa en el método de difusión del gas, y se adopta la matriz de producción de electricidad norteamericana (65% basada en combustibles fósiles). Por otra parte, en los casos de Suecia, el enriquecimiento se realiza ya sea mediante el método centrífugo en el Reino Unido o por difusión de gas en una instalación francesa para la cual la electricidad es producida mediante energía nuclear.

Tabla 6.2. Electricidad proveniente de ciclos de energía renovable y nuclear

	Capac.	Factor de carga	Eq. CO ₂	SO ₂	NOx	NMVOC	Partículas	Ref.
	MW		t/GWh	Kg/GWh	Kg/GWh	Kg/GWh	Kg/GWh	
Solar fotovoltaico								
Australia, amor+multi	400kW		104	320	1330		55	[6.34]
Alemania, monocrist.	4,8 kW		55	104	99		6	[6.13]
Alemania, multicrist	13 kW		51	114	82			[6.13]
Italia, monocristalino	1 kW		43	182	84	14	25	[6.28]
Italia, multicristalino	1 kW		51	215	99	16	31	[6.28]
Italia, amorfo	1 kW		44	203	99	12	55	[6.28]
Italia, GIGS	1 kW		45	185	90	12	35	[6.28]
EE.UU. amorfo	8 kW		12,5					[6.32]
Hidro con embalse								
África	1600	64%	8-15	20-60	8-13			[6.4]
Itaipú, Brasil	12600	68%	3,5-6,5	9-24	3-6			[6.4]
Churchill, Canadá	5428	73%	10-19					[6.4]
Petit Saut, Guayana	116	55%	60-120					[6.4]
Hidro, sistema de pasada								
La Grande, Canadá	15300	58%	33					[6.43]
Lule älv, Suecia	1492	34%	5,1	1,6	4			[6.22]
Ume älv, Suecia	704	51%	4	1,6	4,6			[6.23]
Plantación forestal								
Australia, CCGI	110	80%	36	290	610		26	[6.34]
Francia, CCGI	40	70%	17,7	40	350		40	[6.12]
Reino Unido, CCGI	8	85%	15,1	45	485		79	[6.20]
EE.UU.,CCGI	113	80%	49	302	686	595	42	[6.5]
EE.UU., CCGI, sec CO ₂	600		-667					[6.8]
Eólica								
Australia, onshore	0,6	21%	12,2	59	73		3,5	[6.34]
Dinamarca, onshore	0,5	25%	14,5	32	48			[6.10]
Dinamarca, offshore	0,5	29%	22	45	76			[6.10]
Finlandia, onshore	0,6	23%	8,4	22	26			[6.33]
Alemania, onshore	0,25	25%	6,9	15	20		4,6	[6.13]
Grecia, onshore	0,23	35%	8,2	79	32			[6.14]
Suecia, onshore	0,23-1,75	20%	10,3	23	23			[6.26]
Reino Unido, onshore	0,3	31%	9,1	87	36			[6.20]
ECLIPSE, onshore	0,6	29%	7,4	22	15	1,5	7,8	[6.27]
ECLIPSE, onshore	1,5	29%	12,4	58	24	2,4	14	[6.27]
ECLIPSE, offshore	2,5	46%	9,1	35	21	2,4	11	[6.27]
Nuclear								
Australia, PWR	1000	80%	40	157	240		0,6	[6.34]
Alemania, PWR	1375	89%	20	32	70			[6.13]
Forsmark, BWR	3095	87%	3	11	9			[6.25]
Ringhals, BWR+PWR	3530	82%	3	11	9			[6.26]
Sizewell, PWR	1258	84%	12					[6.20]

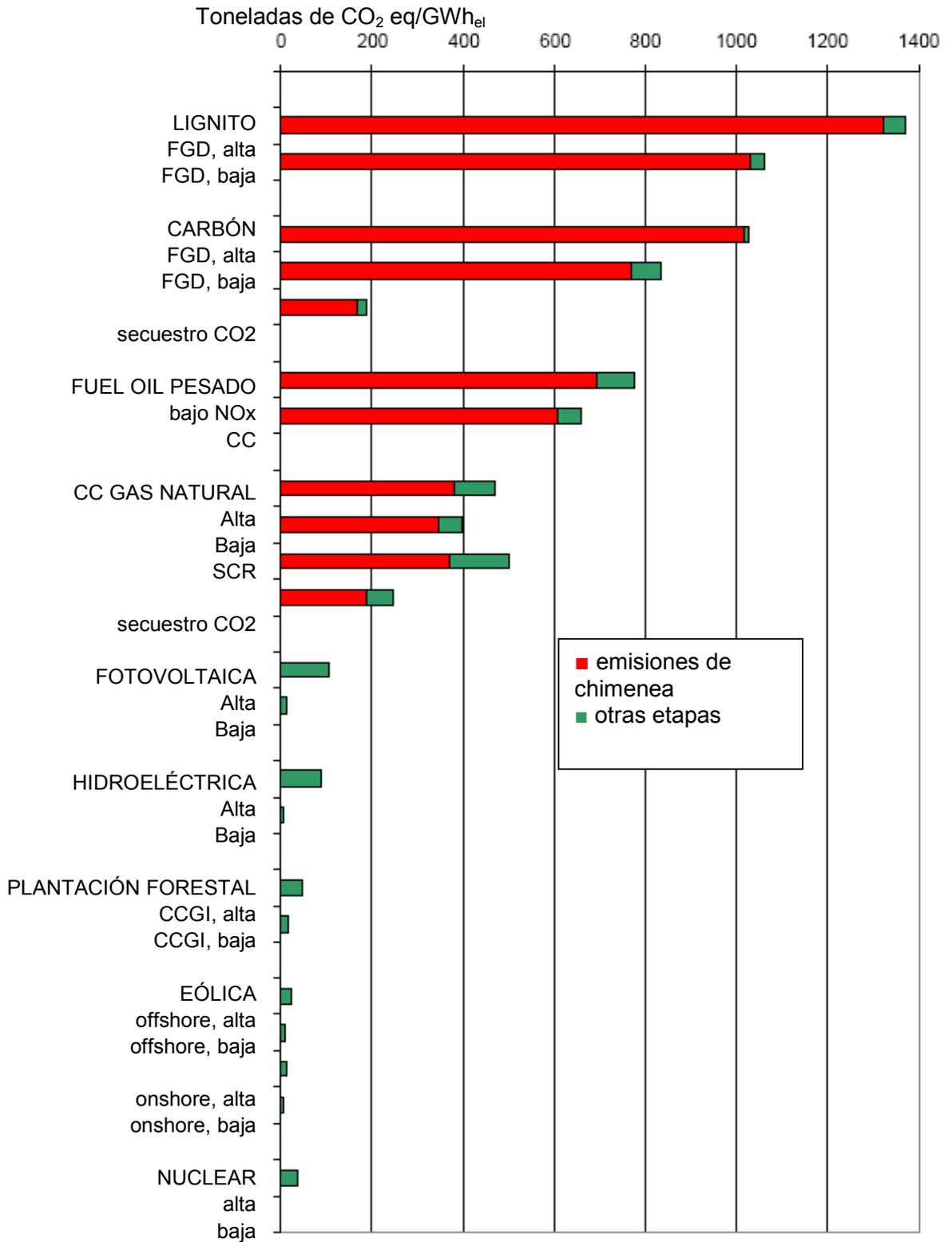


Figura 6.1 Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de sistemas de producción de electricidad alternativos (toneladas de dióxido de carbono equivalente por GWh de electricidad generada)

La Figura 6.1 presenta una comparación de emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de energía fósil, renovable y nuclear. Esta figura ha sido adaptada de la presentación de los resultados del Programa de Evaluación Comparativa de las Fuentes de Energía realizado entre 1994 y 1998 y organizado por la Agencia Internacional de Energía Atómica [Ref. 6.42]. Las emisiones han sido divididas en emisiones directas (chimenea) e indirectas (otras etapas del ciclo de vida). Tal como se señala en la Ref. 6.42, el rango de emisiones evaluadas ha sido indicado presentando los valores máximos (alta) y mínimos (baja) en las Tablas 6.1 y 6.2. Además, en la Figura 6.1 se puede ver el impacto de ciertas tecnologías de control de emisiones (secuestro de CO₂, quemadores de bajo NOx y reducción catalítica selectiva) sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Obsérvese que estos valores representan solo un número limitado de sistemas energéticos y no cubren necesariamente los rangos de las respectivas tecnologías. La Figura 6.2 presenta los resultados para los sistemas de energía renovable y nuclear en una escala que permite realizar comparaciones entre las diferentes alternativas que se señalan en la Tabla 6.2.

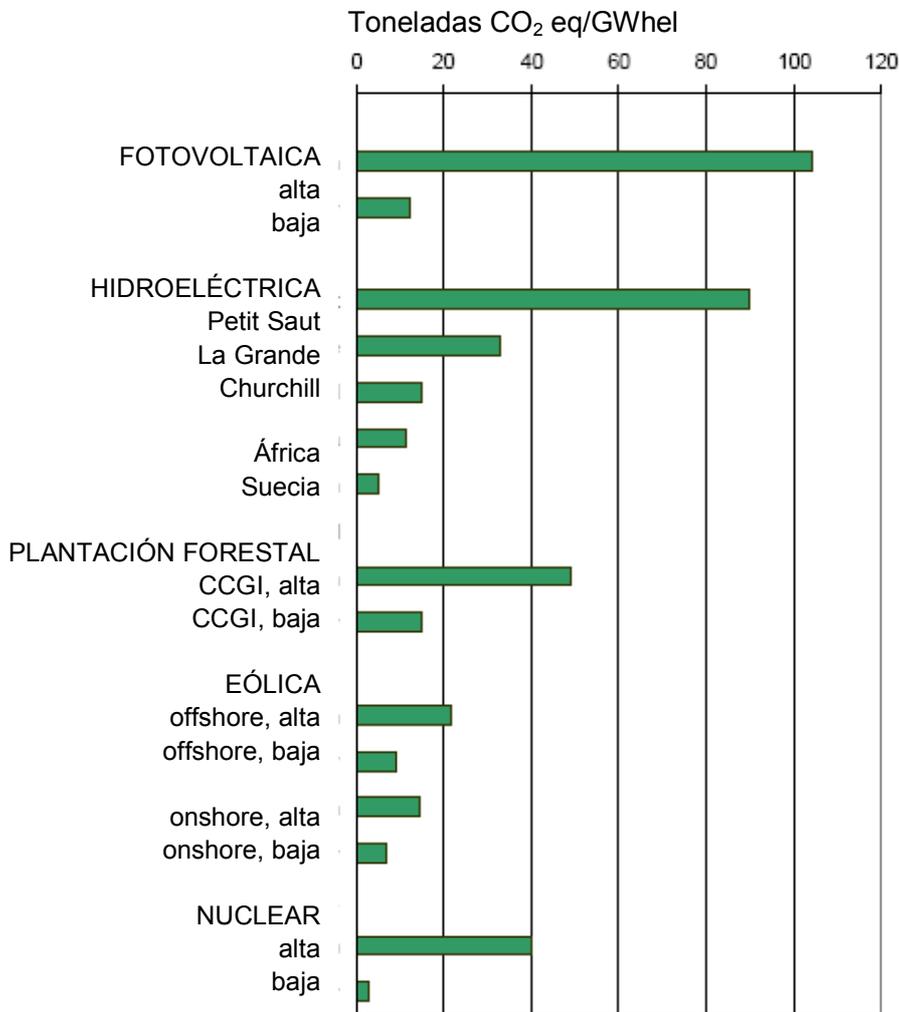


Figura 6.2. Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de sistemas de producción de electricidad renovable y nuclear (toneladas de dióxido de carbono equivalente por GWh de electricidad generada)

Las otras emisiones que no son de gases de efecto invernadero presentadas en las Tablas 6.1 y 6.2 no se muestran en forma de gráfico porque una mera comparación de tecnologías, tales como las de las Figuras 6.1 y 6.2, es bastante difícil para estas emisiones. Las emisiones de dióxido de azufre están determinadas por el contenido de azufre del combustible, que varía considerablemente para el lignito, el carbón y el fuel oil pesado. El contenido de azufre, y posiblemente otras propiedades del combustible, afectan la elección de tecnología de control y la eficiencia de remoción.

6.4. Ciclos de producción combinada de calor y electricidad

La Tabla 6.3 es un resumen de las emisiones del ciclo de vida para los ciclos de combustible con producción combinada de calor y electricidad (PCCE). Los datos de emisión han sido extraídos de los informes del Proyecto de Implementación Nacional ExternE [Refs. 6.9–6.20] y los informes del Proyecto ECLIPSE [Refs. 6.27–6.31]. Para cada ciclo de combustible, el calor producido se utiliza para calefacción de locales. La relación entre la electricidad y el calor para calefacción producido varía según el tipo de sistema energético. Para las centrales existentes, la variación anual de la carga de calor también afecta esta relación.

Para comparar las emisiones del ciclo de vida de diferentes sistemas energéticos unos con otros, las emisiones deben asignarse a la electricidad y a la calefacción de locales producida. Se han propuesto diferentes planes de asignación, pero hasta ahora no hay uno aceptado por todos. El plan de asignación más común se basa en el concepto de exergía. La exergía es la porción de energía que puede ser transformada en trabajo mecánico. Por definición, la energía eléctrica puede convertirse en una cantidad igual de trabajo mecánico. Sin embargo, solo una parte de la energía térmica puede convertirse en trabajo. La cantidad máxima de energía mecánica está determinada por las leyes de la termodinámica (principio de Carnot). La proporción de trabajo mecánico en relación a la energía térmica está dada por el factor de Carnot $p = 1 - T_0/T$, donde T_0 es la temperatura ambiente y T es la temperatura del agua que ingresa en la red de calefacción de locales.

Para determinar la exergía, la fórmula es la siguiente: Indicar la energía eléctrica producida como E y la cantidad de calefacción de locales producida como Q . Entonces la cantidad de exergía producida por el sistema es $E + pQ$. La porción de emisiones atribuida a la producción de electricidad es $E/(E + pQ)$, y la atribuida a la producción de calefacción de locales es $pQ/(Q + pQ)$ veces las emisiones totales.

En situaciones prácticas, el punto de partida es una demanda dada de electricidad y calor urbano. Hay modos alternativos de satisfacer esta demanda. La electricidad se puede producir, por ejemplo, en centrales energéticas de condensación o puede ser extraída de la red principal, y el calor puede producirse, por ejemplo, mediante calderas de calefacción central. Cada una de estas alternativas tiene emisiones específicas de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

En la Tabla 6.3, se han combinado diferentes sistemas energéticos para la producción de electricidad y calefacción urbana sobre la base de exergía anual total producida. Las emisiones totales de gases de efecto invernadero se expresan como toneladas de CO_2 equivalente por 1 GWh de exergía producida. Las emisiones totales de dióxido de azufre SO_2 , óxidos de nitrógeno NO_x , compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC) y partículas han sido expresadas como $\text{kg}/1$ GWh de exergía producida. El factor de Carnot p va de 0,2 a 0,23. Para las referencias donde no se señala ningún valor para el factor de

Carnot, se ha supuesto el valor $p = 0,23$. La Figura 6.3 presenta una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas PCCE divididas en emisiones directas (chimenea) e indirectas (otras etapas del ciclo de vida).

La central energética alimentada a carbón en Västerås (Suecia) está equipada con desulfuración de los gases de combustión y reducción catalítica selectiva. La central energética de ciclo combinado alimentada a gas natural en Linz (Austria) utiliza reducción catalítica selectiva, y la de Hilleröd (Dinamarca) utiliza quemadores de bajo NOx para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Los dos primeros motores de gas natural de vanguardia que aparecen en la Tabla 6.3 funcionan en Alemania. En ambos sistemas, se han instalado catalizadores de oxidación para la reducción de emisiones. El tercer y cuarto ejemplo se basan en tecnologías que se espera estén disponibles alrededor del 2005. En estos sistemas, la relación del aire de la combustión está controlada para asegurarse de que el catalizador de tres vías funciona en condiciones óptimas para la reducción de emisiones. Además, el gas de combustión enfriado vuelve a circular para reducir la máxima temperatura de combustión, lo cual da como resultado una baja producción de NOx. El quinto motor representa el efecto de tecnologías mejoradas que se espera estén disponibles alrededor del 2010.

La primera celda de combustible en la Tabla 6.3 se basa en tecnología de ácido fosfórico (PAFC) y la segunda en tecnología de electrolito a base polímero (PEFC). Ambas son alimentadas a gas natural. Las últimas cuatro celdas de combustible en la Tabla 6.3 se basan en tecnología de óxido sólido (SOFC). La tercera y la cuarta están alimentadas a gas natural. La cuarta celda de combustible está conectada a una micro turbina de gas gracias a la cual la eficiencia eléctrica neta aumenta de 47 a 58%. La quinta celda de combustible está alimentada a hidrógeno. El hidrógeno se produce por electrólisis con electricidad provenientes de una turbina eólica onshore de 1,5 MW. La sexta celda de combustible está alimentada con biogas. Se supone que el biogas es la síntesis del gas producido a partir de virutas de madera. La electricidad y el calor producidos por los sistemas de celdas de combustible se refieren a la vida efectiva supuesta de 100.000 horas [Ref. 6.30].

Los residuos forestales consisten en residuos de la tala de árboles o escamondaduras de los aserraderos. Se los quema ya sea en una chimenea o en un lecho fluido circulante (CFB). La central energética de Norrköping utiliza reducción catalítica selectiva para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno. En la tercera y cuarta central sueca hipotética, el combustible se seca con vapor. La cuarta alternativa es el proceso de ciclo combinado basado sobre gasificación en lecho fluidizado presurizado (PFBG). La segunda y tercera alternativa utilizan reducción selectiva, no catalítica, para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Tabla 6.3. Producción combinada de electricidad y calefacción urbana (por 1 GWh de exergía)

	Capac	Electric.	Cal Urb	CO ₂ eq.	SO ₂	NOx	NMVOC	Partíc	Ref.
	MW	GWh/a	GWh/a	t/GWh	Kg/G Wh	Kg/G Wh	Kg/GWh	Kg/G Wh	
Carbón									
Västerås, FGD, SCR	520	643	1093	880	188	225		215	[6.19]
Ciclo combinado con gas natural									
Linz, SCR	116			551	0,5	333	12		[6.9]
Hilleröd, bajo NOx	77	300	370	539	1,8	500		0,02	[6.10]
Motor de gas natural									
Alemania, autónomo	5	10,7	16,8	601	307	792	343	39	[6.29]
Alemania, adentro	1,3	2,2	4	633	308	820	285	40	[6.29]
Bajo NOx	0,9	2	2,3	534	321	287	449	41	[6.29]
Bajo NOx	0,9	2	2,8	574	392	344	542	49	[6.29]
Futuro	0,9	2,1	2,8	553	378	315	522	47	[6.29]
Celda de combustible grande									
				GWh/ 1000000 h					
PAFC, gas natural	0,47	20	27	618	313	283	233	50	[6.30]
PEFC, gas natural	0,4	20	20	592	284	255	226	43	[6.30]
SOFC, gas natural	0,43	25	17,6	514	228	220	202	37	[6.30]
SOFC + turbina de gas	0,4	29	11	430	188	185	169	31	[6.30]
SOFC, H ₂ , eólica	0,48	25	17,6	71	191	144	3	191	[6.30]
SOFC, biogas	0,43	25	17,6	26	107	190	59	54	[6.30]
Residuos forestales									
		GWh/a	GWh/a						
Reuthe, chimenea	1,2	4,7	29	99	56	1570	170	160	[6.9]
Forras, CFB	17	56,8	155	93	408	1570		210	[6.11]
Alemania, CFB	20	10,8	38,4	20	44	1225	37	31	[6.13]
Figueira da Foz, chimenea	17	127	171	10					[6.17]
Norrköping, CFB, SCR	100	210	552	13	95	475		57	[6.19]
Suecia, CFB	42	30	102	25	111	902	64	58	[6.31]
Suecia, chimenea	100	91	232	36	139	628	97	34	[6.31]
Suecia, chimenea +secado	205	98	397	29	139	959	67	24	[6.31]
Suecia, PFBG	119	260	264	17	300	496	44	42	[6.13]

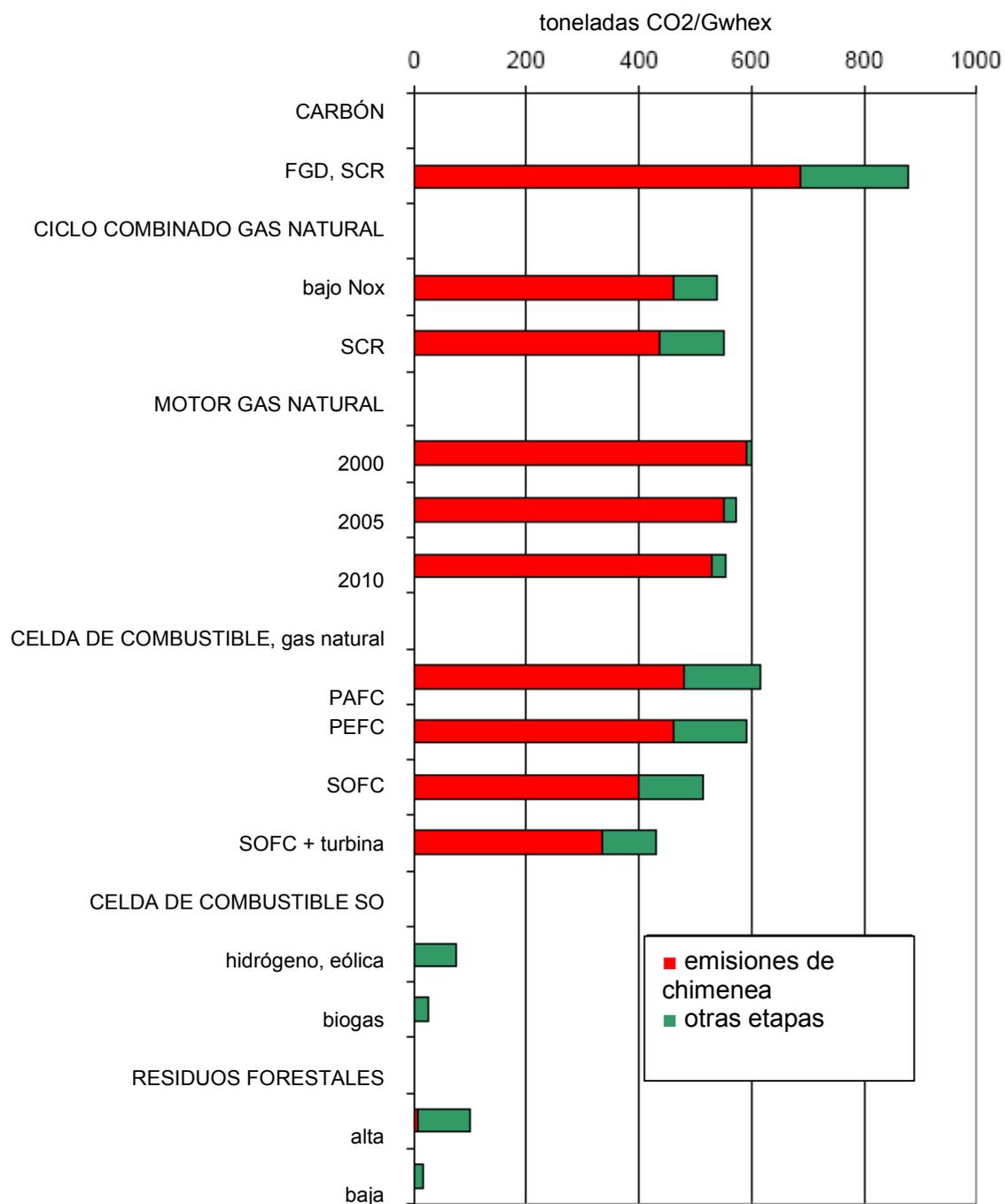


Figura 6.3. Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de sistemas de producción de calor y electricidad alternativos (toneladas de dióxido de carbono equivalente por GWh de exergía generada)

6.5. Calefacción urbana

La Tabla 6.4 es un resumen de las emisiones de ciclo de vida para los ciclos de combustible de calefacción urbana. Los datos han sido tomados del estudio norteamericano realizado por Delucchi [Ref. 6.39] y los estudios suizos realizados en el Instituto Paul Scherrer [Refs. 6.40, 6.41]. El calor es producido por estufas que queman productos del carbón y calderas que queman fuel oil liviano, gas licuado de petróleo, gas natural o astillas de madera. La bomba de calor funciona con electricidad producida ya sea por la matriz suiza (61% hidroeléctrica, 35% nuclear, 3% fósil y 1% renovables) o por una central energética de ciclo combinado alimentada a gas natural. La electricidad que alimenta los calentadores eléctricos se produce en centrales de condensación alimentadas a gas natural, fuel oil o carbón. Nótese que Delucchi [Ref. 6.39] utiliza un conjunto de factores de equivalencia de CO₂ que difieren del especificado por el IPCC en 1996.

Tabla 6.4. Calefacción urbana proveniente de la combustión, bomba de calor y ciclos de electricidad

	Capac. kWth	CO ₂ eq t/GWh	SO ₂ Kg/GWh	NOx Kg/GWh	Ref.
Electricidad					
Gas natural		712			[6.39]
Fuel oil pesado		1007			[6.39]
Carbón		1102			[6.39]
Lignito					
Estufa, briqueta	5-15	700			[6.41]
Carbón					
Estufa, briqueta de carbón duro	5-15	529			[6.41]
Estufa, coque de carbón duro	5-15	575			[6.41]
Estufa, antracita	5-15	484			[6.41]
Fuel oil liviano					
Caldera	10	369			[6.41]
Caldera, condensación	10	342			[6.41]
Caldera	100	365			[6.41]
Caldera, condensación	100	338	450	330	[6.41]
Caldera		357			[6.39]
Gas licuado de petróleo					
Caldera, gases de refinera		323			[6.39]
Caldera, líquidos de gas natural		298			[6.39]
Gas natural					
Caldera, bajo Nox	<100	302			[6.41]
Caldera, bajo Nox, condensación	<100	271	120	180	[6.41]
Caldera		263			[6.39]
Bomba de calor					
Tierra, hidro + nuclear	10	29	125	60	[6.41]
Tierra, ciclo combinado gas natural	10	105			[6.41]
Astillas de madera					
Caldera, madera blanda	50	23			[6.41]
Caldera, madera blanda	300	21	150	700	[6.41]
Caldera, madera dura	50	16			[6.41]
Caldera, madera dura	300	14			[6.41]
Caldera, residuos de aserradero	300	10			[6.41]

La Figura 6.4 representa las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de los sistemas de calefacción de la Tabla 6.4 en forma de gráfico. En la fuente original no se presentó ninguna división entre emisiones directas e indirectas [Refs. 6.39, 6.40, 6.41].

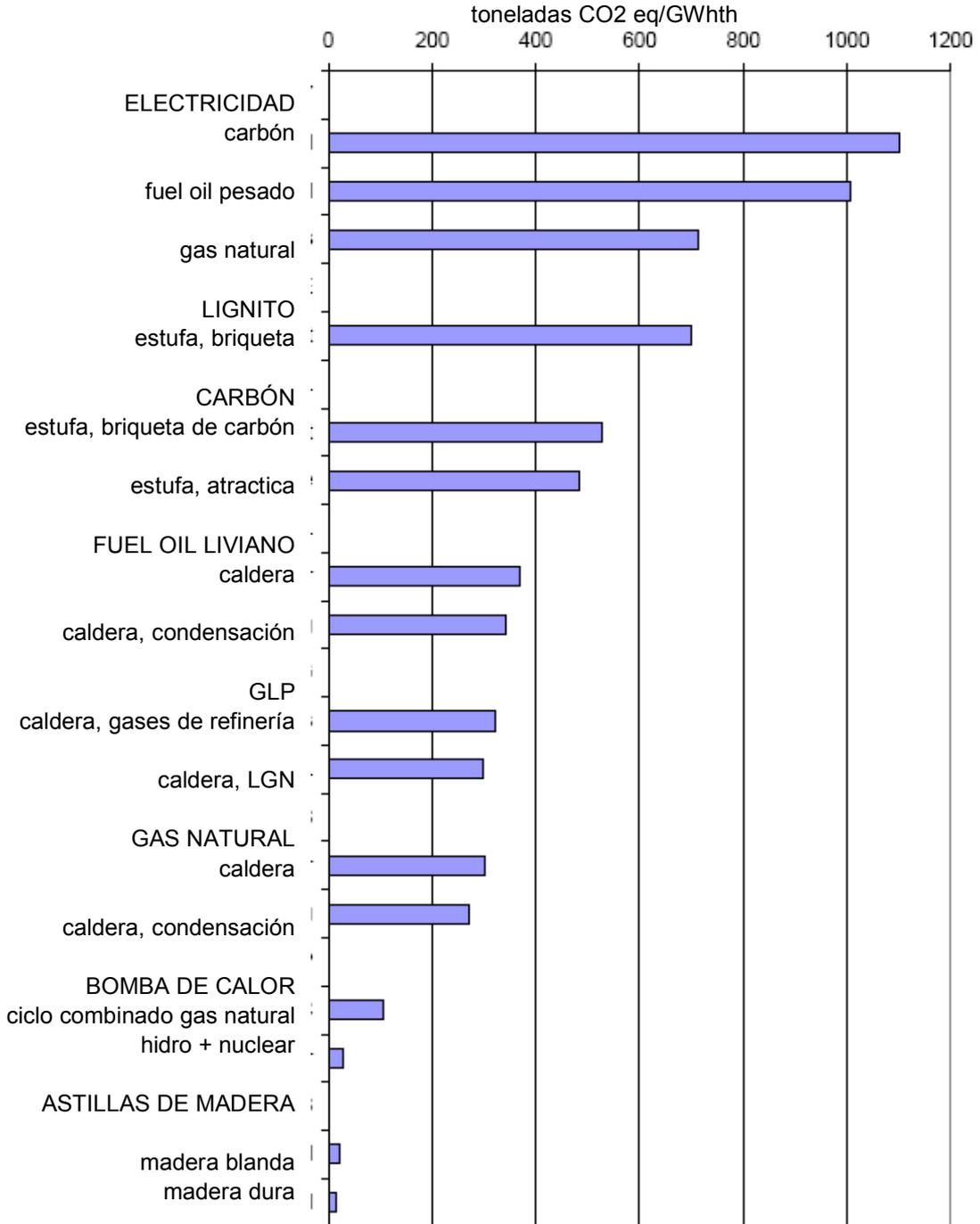


Figura 6.4. Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de sistemas de calefacción urbana alternativos (toneladas de dióxido de carbono equivalente por GWh de calor generado)

6.6. Transporte

La evaluación del ciclo de vida ha sido aplicada a la evaluación comparativa de combustibles alternativos para los automóviles y tecnologías disponibles en el futuro cercano. En la actualidad, 99% de la energía consumida en el transporte vial se basa en el petróleo crudo. Las emisiones de dióxido de carbono son el resultado no solo de la combustión del combustible a bordo del vehículo, sino también de la extracción, transporte, producción y distribución del combustible. El tráfico vial es una fuente principal de emisiones nacionales de dióxido de carbono en los países industrializados. Por lo tanto es razonable comparar combustibles y tecnologías alternativas sobre la base de emisiones de dióxido de carbono como g CO₂eq/km.

Las cadenas de combustible alternativas pueden incluir el uso de fuentes de energía primaria alternativas, innovadoras tecnologías de producción de combustible, nuevos combustibles para los automotores o innovadores trenes motrices para los vehículos. Las fuentes primarias de energía aparte del petróleo crudo pueden ser gas natural, biomasa, energía hidroeléctrica, eólica o solar. De estas fuentes pueden derivarse una gran variedad de vectores energéticos: gasolina, diesel, gas licuado de petróleo, gas natural comprimido, gas natural licuado, metanol, etanol, hidrógeno y electricidad. Para producir estos vectores energéticos, se pueden utilizar diferentes métodos de producción. Además, se puede producir combustible centralmente en centrales de gran escala, localmente en estaciones minoristas o en algún lugar entre las dos. El combustible también puede convertirse a bordo del vehículo. Todas estas opciones crean una amplia gama de cadenas de combustible alternativas [Ref. 6.36].

Dado que hay muchas combinaciones de tren motriz a combustible, la costumbre ha sido de realizar la evaluación del ciclo de vida en dos etapas. La primera etapa se llama pozo-a-tanque y abarca la extracción, transporte, producción y distribución del combustible. La segunda etapa se llama tanque-a-rueda y abarca la conversión de la energía del combustible en movimiento del vehículo. Una evaluación completa del ciclo de vida combina los resultados de estas dos etapas y se llama pozo-a-rueda.

La mayoría de las ECV han considerado solo los vehículos de carga liviana (resumen en Ref. 6.37), aunque se han realizado unos pocos análisis para vehículos para carga pesada (ver Ref. 6.38, por ejemplo). Las Tablas 6.5 y 6.6 reproducen los resultados de dos análisis de ciclo de vida de pozo-a-rueda realizados en Europa para vehículos de carga liviana.

El estudio de GM [Ref. 6.35] combinó catorce combustibles (88 vías de combustible) con 22 trenes motrices de vehículos. Los combustibles considerados estaban basados en petróleo crudo (gasolina, diesel y nafta), gas natural (gas natural comprimido, diesel y nafta hecha con el proceso Fischer-Tropsch, metanol e hidrógeno), biomasa (metano, diesel Fischer-Tropsch, metanol, etanol e hidrógeno) y electricidad (hidrógeno). Se consideró tanto el hidrógeno comprimido como el licuado. Se consideraron varios métodos alternativos de producción de hidrógeno. El hidrógeno comprimido se producía ya sea en una planta central y se lo distribuía por cañerías hasta las estaciones de suministro, o en las estaciones de suministro. El hidrógeno licuado se producía en la planta central y se lo transportaba mediante camiones cisterna criogénicos hasta las estaciones de suministro. Si no, se producía hidrógeno comprimido o licuado con electricidad proveniente de la matriz energética de la UE, central energética de ciclo combinado alimentada a gas natural o turbina eólica.

El vehículo seleccionado para el estudio fue un vehículo polivalente producido en 2002 con un motor naftero 1.8 L de combustión interna y transmisión manual de 5 velocidades. Se proyectó este vehículo hasta el marco temporal del 2010 mediante la introducción de un tren motriz avanzado y algunas mejoras previstas en los vehículos. En este vehículo, se evaluaron tecnologías adicionales de tren motriz, incluyendo:

- tecnologías avanzadas de motor de combustión interna (inyección directa de gasolina, inyección directa diesel de conducto común, encendido optimizado con gas natural, encendido optimizado con hidrógeno) junto con transmisión convencional;
- transmisiones más avanzadas;
- trenes motrices híbridos (motor a combustible y motor eléctrico);
- sistemas de celda de combustible no híbridos e híbridos que utilizan almacenamiento de hidrógeno a bordo y reforma a bordo (de gasolina, metanol y etanol).

El estudio holandés [Ref. 6.36] compara dos fuentes de energía primaria: gas natural y petróleo crudo. Los combustibles basados en el petróleo crudo fueron gasolina, diesel y gas licuado de petróleo, y los combustibles basados en el gas natural fueron el gas natural comprimido y licuado, diesel Fischer-Tropsch, metanol e hidrógeno. Había tres tecnologías de fuerza motriz (motor de combustión interna, híbridos diesel y celda de combustible).

Tabla 6.5 Transporte en vehículos de carga liviana que utilizan combustibles basados en los fósiles (pozo-a-rueda)

g CO ₂ eq/km	Convencional	Convencional	Celda de combustible	Celda de combustible	Ref.
		Híbrido	No híbrido	Híbrido	
BASADO EN CRUDO					
Gasolina	217	160			[6.35]
Gasolina, inyección directa	188	149			[6.35]
Gasolina	199		192		[6.36]
Gasolina			158	137	[6.35]
Diesel	166	140			[6.35]
Diesel	153	120			[6.36]
Nafta			152	134	[6.35]
Gas licuado de petróleo	168				[6.36]
BASADO EN GAS NATURAL					
GNC					
Matriz de gas natural UE	162	127			[6.35]
GN ruso	195	151			[6.35]
de GNL	168	131			[6.35]
GNC	150		129		[6.36]
GNL					
	163				[6.36]
Fischer-Tropsch, diesel					
Fischer-Tropsch, diesel	203	168			[6.35]
	181	142			[6.36]
Fischer-Tropsch, nafta					
			181	154	[6.35]
Metanol					
Metanol			160	142	[6.35]
			154		[6.36]
Hidrógeno comprimido, central					
Matriz gas natural UE	184	136	103	96	[6.35]
GN ruso	223	164	124	221	[6.35]
Hidrógeno comprimido, central	231		115		[6.36]
Hidrógeno comprimido, on-site					
Matriz gas natural UE	211	156	117	109	[6.35]
Hidrógeno comprimido, on-site			122		[6.36]
Hidrógeno licuado, central					
Matriz gas natural UE	253	189	138	131	[6.35]
Remoto	301	226	165	154	[6.35]
Hidrógeno licuado, central			183		[6.36]

Tabla 6.6 Transporte en vehículos de carga liviana que utilizan combustibles basados en biomasa y electricidad (pozo-a-rueda)

g CO ₂ eq/km	Convencional	Convencional	Celda de combustible	Celda de combustible	Ref.
		Híbrido	No híbrido	Híbrido	
BASADO EN BIOMASA					
Metano comprimido					
Residuos orgánicos	6	6			[6.35]
Fischer-Tropsch, diesel					
Madera residual	28	24			[6.35]
Metanol					
Madera residual			13	11	[6.35]
Etanol					
Paja residual			29	25	[6.35]
Plantación forestal			72	65	[6.35]
Remolacha azucarera			103	91	[6.35]
Hidrógeno comprimido, descentralizado					
Madera residual	17	13	8	8	[6.35]
Plantación forestal	47	35	25	23	[6.35]
Residuos orgánicos	4	4	1	0	[6.35]
BASADO EN ELECTRICIDAD					
Hidrógeno comprimido, central					
Matriz electricidad UE	421	312	238	221	[6.35]
Eólica	3	3	0	0	[6.35]
Hidrógeno comprimido, on-site					
Matriz electricidad UE	422	309	238	222	[6.35]
Combi. gas natural	380	280	215	202	[6.35]
Eólica	3	3	0	0	[6.35]
Hidrógeno licuado, central					
Matriz electricidad UE	486	360	270	252	[6.35]
Eólica	7	6	2	2	[6.35]

La Figura 6.5 representa las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos con motor de combustión interna convencional o con tren motriz con celda de combustible para combustibles seleccionados. Las emisiones se han dividido en aquellas que van de las etapas del pozo-a-tanque y del tanque-a-rueda. Las emisiones provenientes de la combustión de combustible basado en petróleo crudo y gas natural provienen principalmente del funcionamiento de los vehículos (etapa tanque-a-rueda). Las emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa pozo-a-tanque de los combustibles basados en la biomasa son negativas, dado que el dióxido de carbono es eliminado de la atmósfera durante el crecimiento de las plantas, y el carbono está químicamente unido al combustible. Durante el funcionamiento del vehículo, el carbono se emite como CO₂, y las emisiones pozo-a-rueda se convierten en positivas [Ref. 6.35].

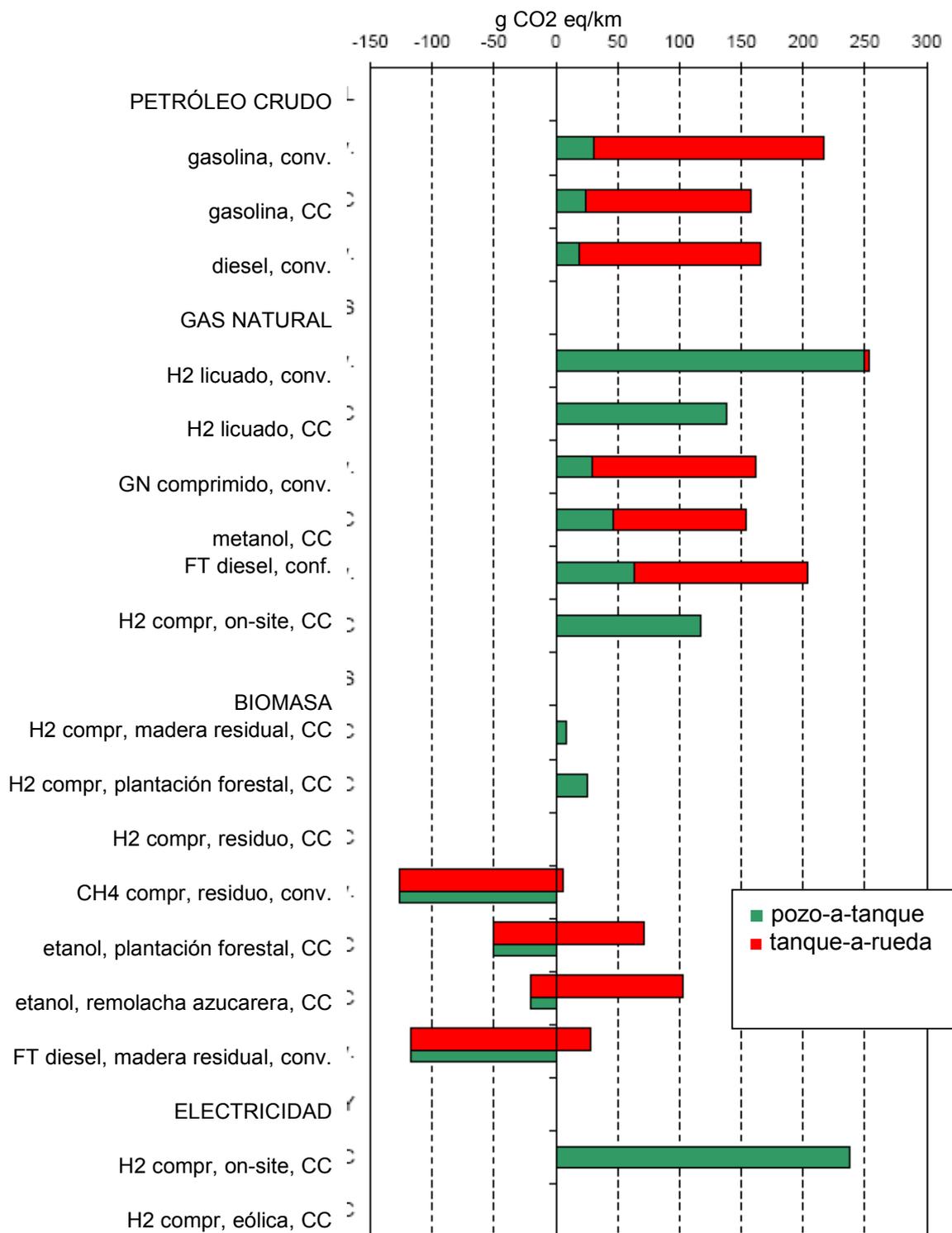


Figura 6.5 Emisión de gases de efecto invernadero provenientes de vehículos de carga liviana con motor de combustión interna convencional o tren motriz con celda de combustible para combustibles seleccionados [Ref. 6.35]

6.7. Otros efectos

La evaluación de las emisiones provenientes de los ciclos de vida de la producción y transporte de energía ha sido el objetivo principal de los estudios debido a los impactos directos e indirectos sobre la salud y el medio ambiente y las convenciones internacionales para control de emisiones. Para los ciclos de vida de producción de energía, también se han tenido en cuenta otros efectos relacionados con el uso racional de la energía, los recursos naturales y la tierra. Este tipo de análisis ha sido utilizado para comparar entre ellos los ciclos de energía fósil y renovable. Dado que las energías renovables (particularmente la solar y la eólica) son “diluidas”, se requieren más materiales y mayores áreas de terreno que para las fósiles.

Un modo de comparar los ciclos renovables con los ciclos fósiles es calcular el llamado tiempo de retorno energético del ciclo de vida. Este concepto se define como el tiempo que tarda el equipo de generación de energía en producir la cantidad de energía igual a la energía requerida para construir, mantener y aportar combustible al equipo. La cantidad de energía combustible utilizada en estos procesos se convierte en la correspondiente cantidad de energía eléctrica, suponiendo que en cambio este combustible se utiliza para generar electricidad.

Otro modo de presentar los resultados de un análisis de ese tipo es calcular la llamada tasa de energía retornada del ciclo de vida. La tasa de energía retornada (o tasa de energía externa) es la tasa de la energía eléctrica neta producida durante el tiempo de vida de una central en relación a la energía requerida para la construcción, el mantenimiento y el aporte de combustible de la central durante su tiempo de vida, convertida en la correspondiente cantidad de energía eléctrica. El informe al que se hace referencia en Ref. 6.3 presenta una tabla-resumen de los estudios de la tasa de energía retornada del ciclo de vida realizados entre 1994 y 1999. En la Tabla 6.7, se resumen los resultados para la tasa de energía retornada del ciclo de vida en estudios norteamericanos seleccionados publicados entre 1999 y 2002. Los estudios fueron realizados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable [Refs. 6.6, 6.7] y la Universidad de Wisconsin [Refs. 6.32, 6.44, 6.45]. Todas las centrales energéticas, excepto la de Cass County, son hipotéticas. La granja eólica con turbinas de 0,34 MW (Buffalo Ridge Fase I) era una existente con un factor de carga real del 24%. Las otras dos granjas eólicas estaban en construcción, y se utilizaron factores de carga proyectados [Ref. 6.45].

El informe al que se hace referencia en Ref. 6.3 también presenta una tabla-resumen de los requisitos de terreno de las diferentes opciones de generación de electricidad. El problema de dichas comparaciones es que las áreas calculadas no son completamente comparables. El área puede tener otros usos simultáneos no relacionados con la generación de electricidad. Por ejemplo, una represa hidroeléctrica también puede ser utilizada para el control de las inundaciones o para riego y a veces para pesca y recreación. Un área de plantación forestal también puede ser utilizada para recreación. Los módulos solares fotovoltaicos generalmente se basan sobre techos que no tienen un uso alternativo.

Tabla 6.7. Tiempo de retorno energético y tasa de energía retornada del ciclo de vida

	Capacidad	Factor de carga	Vida	Retorno	Ref.
	MW		años	tasa	
Carbón					
EE.UU.	1000	75%	40	11	[6.44]
EE.UU., bajo NOx	524	60%	30	5,1	[6.6]
EE.UU., CuO	425	60%	30	6,7	[6.6]
Ciclo combinado de gas natural					
EE.UU, SCR	505	80%	30	2,2	[6.7]
Cass County	620	75%	40	4,1	[6.32]
Eólica					
EE.UU.	0,34	24%	30	14,4	[6.45]
EE.UU.	0,75	35%	25	8,9	[6.45]
EE.UU.	0,6	31%	20	20	[6.45]
Solar fotovoltaica					
EE.UU.	0,008		30	5,7	[6.32]
Nuclear					
EE.UU.	1000	755	40	16	[6.44]

Referencias para el Capítulo 6

- 6.1. *Externalidades de la Energía*. Proyecto ExternE. <http://externe.jrc.es/>
- 6.2. *Inventarios de Ciclo de Vida Ambientales y Ecológicos*. Resultados públicos de ECLIPSE. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.
- 6.3. Agencia Internacional de Energía. *Energía Hidroeléctrica y Medio Ambiente: Contexto Actual y Directrices para Acciones Futuras*. Informe Técnico AIE. Volumen II. Informe principal. AIE: Paris. 2000. 172 p. <http://www.ieahydro.org/Environment/IEA%20AIII%20ST1%20Vol%20II.pdf>
- 6.4. Thorpe, T. Bates, J. & Watkiss, P. *¿Energía Benigna?: Implicancias ambientales de las renovables*. Agencia Internacional de Energía: Paris. 1998. 122 p. ISBN 92-64-16183-X. <http://spider.iea.org/pubs/studies/files/benign/>
- 6.5. Mann, M. K. & Spath, P. L. *Evaluación del Ciclo de Vida de un Sistema de Ciclo Combinado de Gasificación de Biomasa*. Laboratorio Nacional de Energía Renovable: Golden, CO, EE.UU.. 1997. (NREL/TP-430-23076). <http://www.osti.gov/bridge/>
- 6.6. Spath, P. L., Mann, M. K. & Kerr, D. R. *Evaluación del Ciclo de Vida de la Producción de Energía Alimentada a Carbón*. Laboratorio Nacional de Energía Renovable: Golden, CO, EE.UU.. 1999. (NREL/TP-570-25119). <http://www.osti.gov/bridge/>
- 6.7. Spath, P.L. & Mann, M.K. *Evaluación del Cilo de Vida de un Sistema de Generación de Energía de Ciclo Combinado de Gas Natural*. Laboratorio Nacional de Energía Renovable: Golden, CO, EE.UU.. 2000. (NREL/TP-570-27715). <http://www.osti.gov/bridge/>
- 6.8. -----. *Energía de la biomasa y sistemas fósiles convencionales con y sin secuestro de CO₂ – Comparación del Balance Energético, Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Economía*. Laboratorio Nacional de Energía Renovable: Golden, CO, EE.UU.. 2004. (NREL/TP-510-32575). <http://www.osti.gov/bridge/>

- 6.9. *Implementación Nacional del Marco Contable ExternE. Estudio de Caso Austríaco.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.10. *Implementación Nacional ExternE. Dinamarca.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.11. *Implementación Nacional ExternE. Finlandia.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.12. *Costos Externos de la Energía: Aplicación de la Metodología ExternE en Francia.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.13. *Implementación Nacional ExternE. Alemania.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.14. *Costos Externos de la Generación de Electricidad en Grecia.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.15. *Implementación Nacional ExternE. Italia.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.16. *Implementación Nacional ExternE. Países Bajos.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.17. *Implementación Nacional del Marco Contable ExternE en la UE. Portugal.* 1998. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.18. *Implementación Nacional ExternE. España.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.19. *Implementación Nacional ExternE. Suecia.* 1997. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.20. Berry, J. E. et al. *Generación de Energía y Medio Ambiente – Perspectiva del Reino Unido.* 1998. <http://externe.jrc.es/reports.html>
- 6.21. *Estudios de Ciclo de Vida de Vattenfall de la Electricidad Producida en Suecia.* 1996. 23 p. http://www.vattenfall.com/files/lcaeng_03.pdf
- 6.22. *Declaración Certificada de Producto Ambiental de la Generación Vattenfall de la Electricidad producida de la Centrales Hidroeléctricas sobre el Río Lule Älv.* Vattenfall. 2002. <http://www.environdec.com/>
- 6.23. *Declaración Certificada de Producto Ambiental de la Generación Vattenfall de la Electricidad producida de la Centrales Hidroeléctricas sobre el Río Ume Älv.* Vattenfall. 2002. <http://www.environdec.com/>
- 6.24. *Declaración Certificada de Producto Ambiental de la Electricidad proveniente de las Centrales de Energía Eólica Suecas de Vattenfall AB.* Vattenfall. 2003. <http://www.environdec.com/>
- 6.25. *Declaración Certificada de Producto Ambiental de la Generación Vattenfall de la Electricidad proveniente de Forsmark Kraftgrupp AB (FKA).* Vattenfall. 2001. <http://www.environdec.com/>
- 6.26. *Declaración Certificada de Producto Ambiental de la Generación Vattenfall de la Electricidad proveniente de Ringhals AB.* Vattenfall. 2002. <http://www.environdec.com/>
- 6.27. Chataignere, A. & Le Boulch, D. *Sistemas de Turbina Eólica (TE). Informe Final.* ECLIPSE. 2003. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html
- 6.28. Frankl, P., Corrado, A. & Lombardelli, S. *Sistemas Fotovoltaicos (FV). Informe Final.* ECLIPSE. 2004. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html
- 6.29. Briem, S. *Sistemas Combinados de Calor y Electricidad alimentados a gas – motores de combustion interna.* Paquete de trabajo 3. 2004. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html
- 6.30. Viebahn, P. & Krewitt, W. *Sistemas de Celdas de Combustible (CC). Informe Final.* ECLIPSE. 2003. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html
- 6.31. Setterwall, C., Münter, M., Sarközi, P. & Bodlund, B. *Sistemas Energéticos combinados de calor y electricidad alimentados con bio-combustibles. Informe Final.* ECLIPSE. 2003. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html
- 6.32. Meier, P. J. *Evaluación del Ciclo de Vida de los Sistemas de Generación de Electricidad y Aplicaciones para el Análisis de Políticas de Cambio Climático.* Universidad de Wisconsin: Madison, WI, USA. 2002. <http://fti.neep.wisc.edu/FTI/pdf/fdm1181.pdf>

- 6.33. Turkulainen, T. *Tuulivoimalan Elinkaarivointi* [Evaluación del Ciclo de Vida de un Sistema de Turbina Eólica]. Universidad de Tecnología Lappeenranta. Tesis de diploma. 1998. 72 p. + App. 8 p. [En finlandés].
- 6.34. Nunn, J. et al. *Carbón en una Sociedad Sustentable*. ACARP. 2001. <http://ciss.com.au/ref/static/reports/public/acarp/acarp2.html>
- 6.35. *Análisis pozo-a-rueda de GM del uso de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas avanzados de combustible/vehículo – Estudio europeo*. Ottobrunn: L-B-Systemtechnik GmbH. 2002. 135 p. <http://www.lbst.de/gm-wtw/>
- 6.36. Hekkert, M. P., et al. *Gas Natural como alternativa al petróleo crudo en las cadenas de combustible de los automóviles. Análisis pozo-a-rueda y desarrollo de estrategia de transición*. Política Energética 2004. En imprenta.
- 6.37. MacLean, H. L. & Lave, L. B. *Evaluación de las Tecnologías de los Sistemas de Propulsión de Automóviles con Combustibles*. Avances en la Ciencia de la Energía y la Combustión, Vol. 29, 2003, pp. 1–69.
- 6.38. Beer, T. et al. *Análisis de las Emisiones del Ciclo de Vida de los Combustibles Alternativos para Vehículos Pesados. Etapa 1*. (CSIRO atmospheric research report C/0411/1.1/F2 to the Australian Greenhouse Office March 2000). <http://www.greenhouse.gov.au/transport/publications/pubs/lifecycle.pdf>
- 6.39. Delucchi, K. *Análisis de las Emisiones del Ciclo de Vida: Contaminantes del Aire Urbano y Gases de Efecto Invernadero provenientes del Petróleo, Gas Natural, GLP y otros Combustibles para Vehículos de tránsito en las Autopistas, Autoelevadores y Calefacción de Hogares en los EE.UU.* Análisis de los Recursos Mundiales, Vol. 13, No. 1, 2001, pp. 25–51.
- 6.40. Dones, R., Heck, T. & Hirschberg, S. *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de los Sistemas Energéticos, Comparación y Generalidades*. Enciclopedia de Energía, Vol. 3, 2004, pp. 77–95.
- 6.41. Hirschberg, S. "Análisis Comparativo de los Sistemas Energéticos". Conferencia durante el curso, "Physique des systèmes énergétiques II" en École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Junio 18, 2003. <http://lrs.epfl.ch/cours/hirschberg2.pdf>
- 6.42. Spadero, J. V., Langlois, L. & Hamilton, B. *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de las Cadenas de Generación de Electricidad. Evaluación de la Diferencia*. IAEA Bulletin, Vol. 41, No. 2, 2000, pp. 19–24. <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull422/article4.pdf>
- 6.43. Gagnon, L. & Varfalvy, L. *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero provenientes de Reservorios Boreales*. Julio 2000. 8 p. www.hydroquebec.com/environment
- 6.44. White, S. W. & Kulcinski, G. L. "Nacimiento a Muerte" *Análisis de la Tasa de Energía Retornada y las Tasas de Emisión de Gas CO₂ de las Centrales de Energía Eléctrica a Carbón, Fisión, Eólica, y Fusión DT*. Universidad de Wisconsin: Madison, WI, EE.UU. 1999. 17 p. + App. (UWFDM-1063). <http://fti.neep.wisc.edu/FTI/pdf/fdm1063.pdf>
- 6.45. -----. *Retorno Energético Neto y Emisiones de CO₂ proveniente de la Electricidad Generada por el Viento en el Medio Oeste*. Universidad de Wisconsin: Madison, WI, EE.UU. 1998. 45 p. + App. (UWFDM-1092). <http://fti.neep.wisc.edu/FTI/pdf/fdm1092.pdf>

7. OBSERVACIONES DE VARIAS FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA

Las cuestiones relacionadas con la accesibilidad de la energía (relacionadas con los costos directos de la energía), disponibilidad de energía (relacionadas con la dimensión de seguridad/fiabilidad) y aceptabilidad de la energía (externalidades ambientales) forman un marco para los encargados de tomar decisiones mediante el cual se deben medir los méritos relativos de las diferentes opciones. La ECV puede ayudar en cuestiones relacionadas con el impacto ambiental, pero normalmente en una ECV solo se incluye un subconjunto de estos impactos. Se puede sostener con razón también que algunas de estas externalidades no pueden ser cubiertas por el método ECV – o ningún otro método analítico – pero que se las debe tratar en el proceso político.

Las diferentes opciones energéticas difieren en la naturaleza y escala de sus impactos ambientales. La Tabla 7.1 ilustra las características relativas de varias fuentes de energía primaria relacionadas con ciertos factores claves que juegan un rol esencial en la toma de decisiones y que en la mayoría de los casos están cubiertas en los estudios de ECV.

Además de los resultados de los estudios de ECV, hay otros factores que deben explicarse en la toma de decisiones sobre sistemas energéticos. Por ejemplo, se debe abordar la probabilidad y las consecuencias de hipotéticos accidentes. En el caso de las instalaciones nucleares, el nivel de seguridad puede mejorarse aún más mediante la introducción de medidas y procedimientos de seguridad adicionales cuyo objetivo es impedir los eventos iniciales y la evolución de los incidentes que pueden convertirse en accidentes que podrían causar significativas emisiones al medio ambiente. Otro modo de mejorar la seguridad es mediante la mitigación de emisiones mediante medidas adecuadas de manejo de accidentes dentro de las centrales. También se pueden introducir contramedidas fuera de las instalaciones para reducir las consecuencias. Las posibilidades de que haya accidentes en los sistemas hidroeléctricos dependen mucho más de las condiciones locales en torno de una represa en particular. Otros ejemplos son los impactos potenciales a largo plazo causados por las mayores concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera e impactos futuros causados por potenciales emisiones provenientes de los depósitos de residuos nucleares. En estos casos, es difícil comparar los impactos o sumarlos a otros tipos de impactos.

Además, el gradual agotamiento de las fuentes de energía primaria está llevando a la explotación de recursos menos favorables y por lo tanto a mayores impactos ambientales. Esto puede reducir las diferencias entre las cadenas de energía consideradas en relación a los indicadores de impacto incluidos en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Características típicas relativas de varias fuentes de energía primaria en vista de factores claves relacionados con la toma de decisiones basados en los resultados de los estudios de ECV.

Factores importantes para la toma de decisiones	Basados en la combustión				nuclear	hidro	eólica	solar
	carbón	petróleo	gas	biomasa				
Accesibilidad de la energía (relacionado con los costos directos de la energía)	F	M	M	M	F	F	D	D
Disponibilidad de energía (relacionada con la dimensión de seguridad/fiabilidad)	F	M	M	M	F	F	D	D
Aceptabilidad de la energía (externalidades ambientales)	D	D	M	F	F	F	F	F

Clasificaciones relativas en la perspectiva de factores importantes para la toma de decisiones:

F = fuente de energía en posición **favorable**

M = fuente de energía en posición **media/neutral**

D = fuente de energía en posición **desfavorable**

7.1. Electricidad

Hay varios combustibles y medios para producir electricidad. Los combustibles fósiles constituyen la principal fuente de electricidad en el futuro previsible, aunque el crecimiento de los renovables, especialmente eólica, supera ampliamente la tasa de crecimiento promedio. La Figura 7.1 ilustra la producción de electricidad y el crecimiento proyectado según las principales opciones de generación en el 2001 [Ref. 7.1].

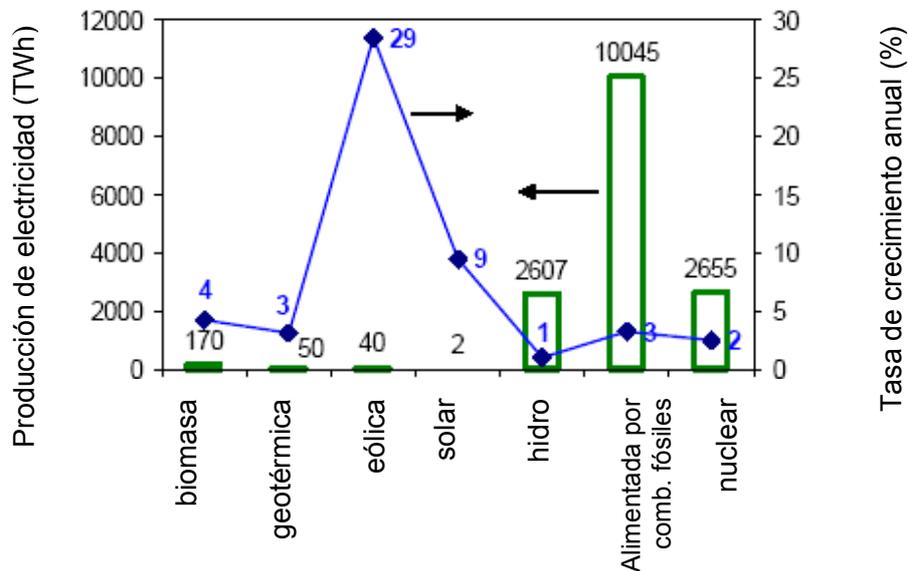


Figura 7.1. Distribución de la producción mundial de electricidad (15.570 TWh) entre las diferentes fuentes de energía y las correspondientes tasas de crecimiento promedio anual durante 1993-2001 [Ref. 7.1]

Existen varias tecnologías para convertir estos vectores energéticos en electricidad. Los combustibles pueden quemarse en chimeneas, molerse y convertirse en polvo y volar como polvo fino con aire para ser encendidos en un quemador o quemados en un lecho de arena caliente. Los combustibles sólidos pueden ser gasificados antes de quemarse, los biocombustibles y los combustibles fósiles pueden mezclarse, etc. Cada uno de ellos requiere una solución tecnológica diferente.

Es evidente que, con tantos combustibles diferentes y tantas tecnologías para transformar estos combustibles en electricidad, evaluar los impactos ambientales de todas las combinaciones de combustible-tecnología no es una tarea fácil. Se hace aún más complicada por el hecho de que el impacto ambiental de una central dada varía con su entorno. Los impactos de una central ubicada lejos de áreas pobladas son muy diferentes de aquellos de una central similar ubicada en un área densamente poblada. Además, esto puede reflejarse en el modo en que se regulan las emisiones de estas centrales. El nivel de impactos ambientales aceptados puede diferir en distintas partes del mundo, dando como resultado niveles desiguales de emisiones. Las condiciones geográficas y meteorológicas locales también tienen un efecto sobre el nivel de concentración que causará una emisión gaseosa dada.

Con la producción de electricidad basada en la conversión de combustibles fósiles, la principal carga ambiental se origina en la central energética. La contribución de las etapas upstream – producción, transporte, etc. del combustible – sobre las emisiones

ambientales constituye como máximo alrededor del 10–15% del total para la mayoría de los ciclos de combustible. Al hacerse más severas las regulaciones para las emisiones de las centrales energéticas, la importancia de la carga ambiental causada por las etapas upstream puede crecer si se demora la regulación de las emisiones en estas etapas.

La carga ambiental de la energía hidroeléctrica, la energía solar y la energía eólica tiene un carácter diferente. Dado que estos sistemas prácticamente no crean emisiones durante el funcionamiento, las emisiones son el resultado de la etapa de construcción. Los sistemas de producción de energía en sí mismos ocupan o pueden inundar grandes parcelas de terreno o requerir que se embalsen los cursos de agua, lo que hace que la población deba reubicarse. Los impactos visuales de estas opciones de electricidad pueden ser importantes pero no son cuantificados o evaluados fácilmente.

Dado que la energía bajo la forma de electricidad es un importante insumo en muchos procesos industriales, y dado que hay varias alternativas para la producción de energía, muchas ECV sobre la producción de electricidad se han llevado a cabo en numerosos institutos y compañías en todo el mundo.

Normalmente, las ECV se realizan para un propósito específico. Si se hace un estudio comparativo, el analista tiene dos o más alternativas para comparar. Una de ellas puede ser la opción de no construir la central y en cambio importar la electricidad. Hay varios sitios alternativos para ubicar la central.

Se debe ser prudente al reunir los resultados de estos tipos de estudios. Los resultados pueden no ser fácilmente importados a situaciones diferentes. Si los informes no son transparentes, las opciones que han hecho los analistas no pueden ser rastreadas. Algunas de estas elecciones pueden ser muy específicas de un caso, y el uso de los resultados de dichos estudios en diferentes circunstancias podría llevar a decisiones incorrectamente basadas.

7.2. Categorías de Impacto

En la Tabla 7.2 se presentan los principales impactos de la producción de electricidad de los diferentes métodos de producción. Algunos impactos surgen durante la producción de combustible, otros durante la construcción de la central y otros durante la producción de energía.

Tabla 7.2. Impactos ambientales más significativos de las formas de producción de energía [Ref. 7.2]

Tipo de impacto	Basados en la combustión				nuclear	hidro	eólica	solar
	carbón	petróleo	gas	biomasa				
Agotamiento de los recursos	X	X	X		X			
Uso de la tierra, impacto visual	(X)			X		X	X	X
Regulación de los cursos de agua						X		
Emisiones térmicas	X	X	X	X	X			
Ruido							X	
Radiación					X			
Calidad del aire	X	X	X	X				
Acidificación	X	X	X	X				
Eutrofización	X	X	X	X				
Efecto invernadero	X	X	X	X				

7.3. Emisiones de la combustión

Un sistema energético de combustión emite varios tipos de materiales: dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos, aerosoles primarios y secundarios, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, etc. El nivel y la mezcla dependen del combustible y de la tecnología utilizados. El nivel de emisión es diferente en diferentes niveles de energía, en funcionamiento en estado estacionario y en transitorios. Para obtener resultados significativos, se deben tomar una serie de decisiones acerca de los parámetros que afectan el estudio, y se las debe explicar claramente y en detalle.

Algunas de las emisiones pueden ser calculadas o medidas con razonable exactitud, pero para algunas sólo se pueden hacer cálculos aproximados. Se pueden hacer cálculos relativamente buenos de las emisiones de CO₂, NO_x, SO₂, emisiones térmicas y residuos sólidos. Hay mediciones y cálculos de las emisiones totales de polvo y MP10, pero esto es menos cierto para fracciones más delicadas, MP2,5, MP1 y nanopartículas.

Los impactos de estas emisiones dependen de la ubicación, el recipiente y la escala de la operación. Por ejemplo, los impactos de las emisiones térmicas en el mar son diferentes de aquellos en los cuerpos de agua del interior. Los impactos del aire de baja calidad en áreas escasamente pobladas son diferentes de los impactos en las áreas urbanas.

Referencias para el Capítulo 7

7.1. Manoha, B. "Rendimiento de la Central de Generación". Presentación en el Grupo de Trabajo del CME sobre Energía Renovable. Kiev. Septiembre 2003.

7.2. Kara, M., Mattila, L., Viinikainen, S., Wolff, J. and Lind, I., eds. *Energia Suomessa. Tekniikka, talous, ympäristövaikutukset*. [Energía en Finlandia, Tecnología, Economía, Impactos Ambientales] Centro de Investigación Técnica de Finlandia: Espoo. 1999. 368 p. ISBN 951-37-2745-9. [En finlandés]

8. CONCLUSIONES

Para un asunto ambiental dado, la evaluación del ciclo de vida abarca exhaustivamente todos los procesos y emisiones ambientales comenzando con la extracción de materias primas y la producción de energía utilizada para crear el producto mediante el uso y disposición final del producto. La ECV extiende los análisis ambientales normales realizados, por ejemplo, a los fines de obtener autorización, en su tratamiento de la totalidad del ciclo de vida del producto. De este modo también se incluyen las emisiones originadas fuera del alcance de las regulaciones locales, regionales e incluso nacionales.

La realización de una ECV provee a la protección ambiental un enfoque centrado en el producto. Específicamente, la ECV provee información sobre qué etapa del ciclo de vida de un producto causa las mayores exigencias ambientales y ayuda de este modo a los actores en las varias etapas de la vida del producto a compartir la responsabilidad de reducir los impactos ambientales de los productos. La información proveniente de una ECV puede ayudar a centrar los esfuerzos en la disminución de los impactos ambientales en el punto en que estos esfuerzos son más efectivos.

8.1. Resultados

El principal uso de la ECV para los sistemas de producción de energía es calcular las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la producción de cantidades unitarias de electricidad, calor o (en producción combinada de electricidad y calor) una combinación (basada en el principio de la exergía) de ambos. De este modo, los sistemas alternativos pueden ser clasificados según sus respectivas emisiones de gases de efecto invernadero. Esta clasificación puede verse en la Figura 6.1. La ventaja de analizar ciclos de vida completos en comparación al uso exclusivo de los factores de emisión es que los sistemas renovables y nucleares sin emisiones directas (de chimenea) pueden compararse con los sistemas basados en la combustión de combustibles fósiles. Lo mismo se aplica a la calefacción urbana y al transporte.

Con la producción de electricidad basada en la conversión de combustibles fósiles, la principal carga ambiental se origina en la central energética. La contribución de las etapas upstream – producción, transporte de combustible, etc. – sobre las emisiones ambientales constituye como máximo alrededor del 10–15% de las emisiones totales para la mayoría de los ciclos de combustible.

Dado que todas las centrales energéticas alimentadas a carbón analizadas en los informes incluidos en este estudio son bastante nuevas o hipotéticas, tienen eficientes tecnologías de control de las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas. Las emisiones de dióxido de azufre están determinadas por el contenido de azufre del combustible, que varía bastante para el lignito, el carbón y el fuel oil pesado. El contenido de azufre, y posiblemente otras propiedades del combustible, afectan la elección de tecnología de control y eficiencia de eliminación.

Una característica común de los ciclos de vida de las fuentes de energía renovable y de la energía nuclear es que las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos surgen en etapas en el ciclo de vida diferentes a las del caso de la generación de electricidad. Estas etapas son la extracción de la materia prima, la fabricación de componentes, el transporte de combustibles y materiales, y la construcción y desmantelamiento de las instalaciones. Las emisiones de estas etapas dependen, entre

otros factores, de la matriz nacional de producción de electricidad. En los países donde la mayor parte de la electricidad se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles (por ejemplo EE.UU 61%), las emisiones son mayores que en los países que utilizan menos combustibles fósiles en la producción de energía (por ejemplo Suiza 3%).

Los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano) son emitidos de los embalses hidroeléctricos debido a la degradación natural de la vegetación y el suelo inundados por parte de los microbios. Las emisiones reales varían considerablemente entre los proyectos individuales, dependiendo del área inundada, el tipo de vegetación, el tipo de suelo y la temperatura. Además, las emisiones varían con el tiempo. Como resultado, es difícil calcular los valores promedio de la emisión.

En estas evaluaciones, la comparación entre los combustibles y las fuentes renovables y nuclear es favorable. Al utilizar nuevas tecnologías fósiles avanzadas con mayores eficiencias, el rendimiento medioambiental del uso del combustible fósil puede ser mejorado en forma significativa.

En las aplicaciones para calefacción, el uso directo de combustibles se compara favorablemente con la calefacción eléctrica basada en los mismos combustibles. En la producción combinada de calor y electricidad, la eficiencia del uso del combustible es similar a la de la conversión directa en calor. Las aplicaciones de PCCE son ventajosas si hay una demanda sincrónica de calor y electricidad.

En las aplicaciones para transporte, las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por diferentes opciones de usos de combustibles fósiles varían aproximadamente en un factor de dos, con las emisiones de las aplicaciones de celda de combustible en el extremo inferior. El uso de combustibles basados en la biomasa tiene como resultado emisiones que están aproximadamente un orden de magnitud más abajo que las emisiones provenientes de los combustibles fósiles. En casos donde se necesita electricidad para el proceso de conversión, las suposiciones relacionadas con la fuente de electricidad imponen los resultados.

8.2. Uso del método

Agregar la evaluación del ciclo de vida al proceso de toma de decisiones provee una comprensión de la salud humana y de los impactos ambientales tradicionalmente no considerados al seleccionar un producto o un proceso. Esta valiosa información provee un modo de explicar los impactos totales de las decisiones, especialmente aquellos que ocurren fuera del sitio, que están directamente influidos por la selección de un producto o un proceso.

La realización de una ECV completa requiere recursos significativos. Generalmente, al menos parte de los datos necesarios son tomados de datos genéricos o de otros análisis. El profesional que realiza la ECV debe mantener con claridad en su mente cuál es el alcance y el objetivo del estudio, y debe evitar tomar atajos donde ellos podrían comprometer el objetivo. Es necesario conocer tanto los procesos a ser estudiados como el método de ECV.

Factores que limitan la aplicabilidad de la ECV

Los límites a la aplicabilidad de la ECV se deben principalmente a:

- incertidumbres acerca de los resultados;
- alcance incompleto (no se abarcan algunos impactos);
- análisis estático (no se refleja el progreso tecnológico); y
- carácter del método específico del sitio.

Incertidumbres. Las incertidumbres acerca de los resultados crean un desafío para usar aquellos resultados en la formulación de políticas. Dado que los resultados son específicos del sitio, no es fácil sacar conclusiones genéricas de los estudios de ECV. Primero, existe una falta generalizada de coherencia metodológica entre las diferentes fuentes. Aunque la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha emitido una serie de estándares (ISO 14040 a 14043) que establecen los conceptos básicos y los procedimientos generales para realizar una ECV, estos estándares siguen siendo muy generales y requieren interpretación ad hoc cuando se los debe aplicar a la evaluación de los sistemas energéticos. Esta falta de directrices claras y específicas se refleja en muchos informes de ECV disponibles, que también carecen de armonización y transparencia en cuanto a sus suposiciones metodológicas (elección de los límites del sistema, procedimientos de asignación, tipo de emisiones a ser rastreadas, etc.).

Como consecuencia, una significativa cantidad de datos de ECV actualmente disponibles son usados incorrectamente porque el alcance del estudio original de ECV a menudo no encaja con los requisitos de otros usuarios. Esta situación puede limitar seriamente la capacidad de uso de los datos de ECV para análisis y modelado de sistemas energéticos.

Limitaciones de alcance. La naturaleza de conjunto de la ECV, que abarca una cadena completa de actividades que tienen lugar en varias jurisdicciones, limita su pertinencia para la formulación de políticas. Dado que el alcance de la ECV no abarca la seguridad del suministro, la integridad del ecosistema, la biodiversidad o los impactos sociales, el enfoque no es lo suficientemente abarcador para medir la sustentabilidad de un sistema energético.

Existe una considerable interfaz entre la ECV y la economía del agotamiento de los recursos, y aún no se ha respondido la pregunta acerca de si las decisiones económicas actuales reflejan correctamente el agotamiento de los recursos.

Quizás el asunto más importante en la ECV es la cuestión del tiempo y del descuento. Esto es particularmente importante en la discusión del problema de la emisión de gases de efecto invernadero, ya que el daño causado por el calentamiento global tendrá lugar principalmente en un futuro bastante distante y variará con el tiempo; por lo tanto no puede ser evaluado definitivamente en la actualidad.

Muchos impactos no cubiertos. Además, la ECV se centra en lo que puede ser fácilmente analizado, pero no es muy útil para criterios que no pueden ser fácilmente cuantificados. No se reflejan las diferencias en los sistemas de valores sociales entre países. No hay certeza acerca de si un valor puede ser ubicado en estética u otra externalidad cualitativa. Existe investigación, parte de la cual ya está incorporada en la ECV, que no trata de cuantificar dichas externalidades, por ejemplo mediante la voluntad de pagar para evitarlas. Sin embargo, los impactos sobre la diversidad biológica son mucho más difíciles de definir ya que no sabemos qué son, cómo medirlos, cómo están afectados por diferentes opciones de provisión de combustible para generación o transporte de energía o cómo medir los cambios en la biodiversidad causados por esos impactos.

En la mayoría de los estudios realizados, se han tenido en cuenta las emisiones provenientes de la combustión (SO₂, NO_x, partículas y gases de efecto invernadero). En lo que se refiere a las fuentes de energía estudiadas, las emisiones de gases de efecto invernadero parecerían llevar un peso relativamente grande. Esta es en parte una consecuencia lógica del hecho de que los estudios han abarcado primariamente nuevas centrales energéticas donde se ha prestado atención a la reducción de las emisiones de azufre, nitrógeno y partículas.

Los asuntos relacionados con la biodiversidad y los recursos naturales no renovables no han sido examinados tan intensamente como las emisiones arriba mencionadas. Los sistemas de calificación del impacto ambiental relacionados con el uso de la tierra y la biodiversidad asociada también parecen ser en cierto modo complicados y difíciles de interpretar. Sin embargo, aún sobre la base de cálculos de muestra, queda claro que estos asuntos pueden tener una importante influencia sobre la calificación del impacto ambiental. De este modo, la insuficiente consideración de la biodiversidad y los recursos naturales esencialmente debilita la credibilidad de los métodos de evaluación.

Los métodos no son exhaustivos; por ejemplo, para una gran cantidad de asuntos, los métodos no son lo suficientemente completos como para ser aplicados a la comparación de todas las fuentes de energía. Actualmente no es posible utilizar estos métodos para evaluar asuntos tales como los riesgos de la producción de electricidad, los valores paisajísticos o el aprovechamiento de los ríos. El problema de convertir los impactos ambientales a una escala común es la insuficiencia de información disponible, por un lado, y la dependencia de valores subjetivos, por el otro lado. Además, no es evidente que los resultados de la investigación sean transferibles a otro lugar o tiempo.

Limitada temporal y espacialmente. Los desarrollos tecnológicos que pueden cambiar significativamente los impactos del ciclo de vida no se toman en cuenta, dado que la evaluación es estática y no refleja la evolución del sistema dinámico. Las bases de datos de ECV sobre sistemas energéticos disponibles al público a menudo no incluyen datos actualizados y transparentes sobre sistemas de generación de electricidad renovables nuevos y descentralizados.

Dada la creciente importancia que se supone asumirán estas tecnologías en el futuro, esto debe verse como un defecto serio. Además, los pocos datos disponibles actualmente a menudo son demasiado generales y no explican el hecho de que el rendimiento de estos sistemas cambia significativamente como una función de las condiciones geográficas y climáticas bajo las cuales operan.

Otro aspecto que limita seriamente la aplicabilidad de los datos del ICV para los objetivos de modelado, planificación y adopción de políticas energéticas es que se han desarrollado muchas bases de datos sin la opción de futuras actualizaciones. El rápido desarrollo tecnológico que domina el sector energético en la actualidad está haciendo obsoletas estas bases de datos. De ahí que muchas decisiones de políticas importantes y resultados de modelado corran el riesgo de estar basados en datos que, a pesar de su aparente solidez, a menudo son inexactos u obsoletos.

Como consecuencia, una significativa cantidad de datos de ICV actualmente disponibles se usa incorrectamente dado que el alcance del estudio original de ECV no es adecuado para los requisitos de otros usuarios. Esta situación limita seriamente la capacidad de uso de los datos de ICV para el análisis y modelado del sistema energético.

La ICV para brindar soporte a la toma de decisiones se basa solamente en agentes agresores pertinentes. En la mayoría de los casos, al utilizar la ECV para comparar diferentes opciones, sólo unos pocos agentes agresores resultan ser pertinentes. La pertinencia puede ser definida de muchas maneras y depende del objetivo del estudio. Los ICV y las bases de datos que se utilizan para muchos tipos diferentes de apoyo a las decisiones carecen de una definición de objetivo único, y por lo tanto, la pregunta clave sigue siendo: ¿Qué es “pertinente”?

Comentarios finales. Sumar la ECV al proceso de toma de decisiones provee una comprensión de los impactos sobre el medio ambiente y la salud humana no considerados tradicionalmente al seleccionar un producto o proceso. Esta valiosa información provee un modo de explicar los impactos totales de las decisiones, especialmente aquellos que tienen lugar fuera del sitio, que están directamente influidos por la selección de un producto o proceso.

Utilizar los resultados de una ECV de otra persona puede ser riesgoso. Si los supuestos y las opciones elegidas no son claramente explicados en detalle, existe el peligro de ser llevado en un sentido equivocado. Los resultados de las ECV tienden a sobrevivir su aplicabilidad.

Es importante recordar que la ECV es una herramienta para informar mejor a los encargados de tomar decisiones y debería ser incluida junto con otros criterios de toma de decisiones, tales como el costo y el rendimiento, a fin de tomar una decisión bien equilibrada.

8.3. Algunas áreas posibles para futura investigación

Algunas áreas posibles para futura investigación incluyen:

- evaluación de externalidades tales como seguridad y diversidad de suministro;
- más investigaciones en el campo de las tasas de descuento aplicables en el muy largo plazo y el valor de la vida estadística;
- incorporación de dinámicas, progreso tecnológico en la ECV;
- eficiencia energética de la cadena de producción;
- evaluación de las medidas de políticas energéticas con ECV;
- establecimiento de una base de datos que contenga información sobre evaluación de externalidades y el modo en que se la utiliza.

Finalmente, debe recordarse que “las políticas decidirán” cómo y hasta qué punto los impactos ambientales están en última instancia incorporados en las decisiones económicas; los políticos no están tomando las mejores decisiones posibles en el mejor de los mundos posibles.

ANEXO A: MIEMBROS DEL GRUPO DE ESTUDIO Y EXPERTOS INVITADOS
Miembros del Grupo de Estudio

Sr Ami Rastas	Presidente del estudio - Teollisuuden Voima Oy, FINLANDIA
Sr Pekka Järvinen	Líder del proyecto - Enprima Ltd, FINLANDIA
Sra Milja Aarni	Federación de Industrias Energéticas Finlandesas, FINLANDIA
Dr Hani Alnakeeb	Organización para la planificación energética, EGIPTO
Sr Ramón Alvarenga	ITAIPU BINACIONAL, BRASIL
Sr Didier Beutier	AREVA, FRANCIA
Sr Luis Colmonero	Galp Energia SGPS SA, PORTUGAL
Sr Chris Cooper	Asociación Nacional de Energía Sudafricana, SUDÁFRICA
Sr Altino Filho	ELETROBRAS, BRASIL
Dr. Luc Gagnon	Hydro-Québec, CANADA
Prof Dr Ing Jürgen Giesecke	Universität Stuttgart, ALEMANIA
Dr. Hermann Holfeld	Siemens Nuclear Power GmbH, ALEMANIA
Prof Dr Marek Jaczewski	Instytut Energetyki, POLONIA
Sr Jyoti Mehta	National Thermal Power Corporation, INDIA
Dr Young-Seok Moon	Instituto de Economía Energética de Corea, COREA
Dr Ing Abdulah Nabijovici	Instituto para la Investigación e Ingeniería de Equipo de Generación de Energía Térmica (ICPET), RUMANIA
Prof Dr Nada Pop-Jordanova	Universidad de Skopje, MACEDONIA
Sr E.J. Postmus	Gasunie, PAÍSES BAJOS
Sr Juan Salas	UNION FENOSA, ESPAÑA
Sr Rangsan Sarochawikosit	Departamento de Desarrollo y Eficiencia de Energía Alternativa (DEDE), TAILANDIA
Sra Myriam Truchon	Hydro-Québec, CANADA

Otras organizaciones participantes

Sr P. Abeygunawardena	Banco de Desarrollo Asiático, FILIPINAS
Sra Christine Copley	Instituto Mundial del Carbón, REINO UNIDO
Sr. Luis Echávarri	OCDE / Agencia de Energía Nuclear, FRANCIA
Sr Malcolm Grimston	Royal Institute of International Affairs, REINO UNIDO
Sr Malcolm Keay	Instituto Mundial del Carbón, REINO UNIDO
Sr Acher Mossé	EPRI América Latina, BRASIL
Sr Mostafa Paveh	Niroo Research Institute, IRAN
Dr Hans-Holger Rogner	IAEA, AUSTRIA
Dr Maria Viridis	ENEA, ITALIA
Sr William Webster	Comisión Europea, BÉLGICA