2009

Modelos Integrales de Economía y Cambio Climático

La ruta de México hacia una economía sustentable de alta eficiencia energética y baja intensidad de carbón

3er REPORTE

METODOLOGÍA PARA VALORAR LAS EXTERNALIDADES ASOCIADAS CON LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

centro mario molina

Contrato Número SE-S 03/2009

Folio No. 001

Preparado por:

CENTRO MARIO MOLINA
para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.

Dr. Mario Molina
Presidente

Ing. Carlos Mena Brito
Director Ejecutivo

M. en C. Rodolfo Lacy Tamayo
Coordinador de Programas y Proyectos

Diana Verónica Noriega
Ingeniera de Proyecto

Graciela Hernández
Ingeniera de Proyecto

Erika Ortiz Sánchez
Economista

Enrique Rebolledo
Consultor

Santiago Mata
Consultor

José Castellanos
Consultor

Augusto Vera
Consultor

César García
Consultor

Folio No. 003

INDÍCE

LISTADO DE ACRÓNIMOS 6

RESUMEN EJECUTIVO 8

1. CONCEPTOS GENERALES Y ANTECEDENTES SOBRE EXTERNALIDADES 10

2. METODOLOGÍAS Y ESTUDIOS INTERNACIONALES DE VALORACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES 14

2.1. Metodología de la Directiva Europea de Valoración de Externalidades (ExternE) 14

2.2. Metodología Eco-indicador 99 17

2.3. Comparación de los Sistemas de Energía utilizando el Ciclo de Vida, reporte especial del *World Energy Council* (WEC) 21

2.4. Evaluación de las externalidades ambientales de la Generación Termoeléctrica en México (CEPAL) 25

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA 27

3.1. Herramientas para el análisis de ciclo de vida 35

4. ALTERNATIVAS DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES 38

4.1. Caracterización de los costos de daño ambiental 39

4.1.1. Caracterización del valor de los daños ambientales ligados a la salud 40

4.1.2. Caracterización del valor de los daños ambientales ligados a la agricultura y la infraestructura 43

4.1.3. Caracterización del valor de los daños ambientales ligados a los ecosistemas 43

5. PROPUESTA PARA LA VALORACIÓN DE EXTERNALIDADES DEL SECTOR ELÉCTRICO EN MÉXICO 44

5.1. Contaminantes involucrados en la Generación de Energía Eléctrica 48

5.1.1. Emisiones Atmosféricas 48

5.1.2. Descargas al Agua 49

5.1.3. Generación de Residuos Sólidos 51

5.2. Metodología para la Fase 1 de aplicación del Análisis de Ciclo de Vida del Sector Eléctrico de México 53

5.2.1. Objetivo 53

5.2.2. Alcance 53

5.2.3. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida 55

5.2.4. Evaluación del Impacto 56

5.2.5. Interpretación del Ciclo de Vida 56

5.3. Estimación de emisiones a la atmósfera 58

5.4. Métodos para calcular el valor de la reducción de emisiones 58
5.4.1. Estimación Directa. 59
5.4.2. Estimación del valor de los Costos de Mitigación 60
6. RECOMENDACIONES EN APOYO AL ACV INICIAL BASADO EN LA GENERACIÓN 64
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66
ANEXO 1. LISTA DE VERIFICACIÓN PARA UNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO 68
ANEXO 2. FORMATOS PARA INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA 71

LISTADO DE ACRÓNIMOS

ACV	Análisis del Ciclo de Vida
AVAD	Años de Vida Ajustados por Discapacidad
BAU	Business as Usual
CADIS	Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable
CCS	Captura y Almacenamiento de Carbono *(Carbon capture & storage)*
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CM	Costos de Mitigación
CO_2	Bióxido de Carbono
COPAR	Costos y parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos
DAA	Disposición a Aceptar
DALYs	Número de años perdidos y el número de años que se ha padecido una enfermedad *(Disability-adjusted life year)*
DAP	Disposición a Pagar
EICV	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida
FE	Factor de Emisión
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
IEA	Agencia Internacional de Energía *(International Energy Agency)*
IGCC	Ciclo Combinado con Gasificación Integrada *(Integrated Gasification Combined Cycle)*
IRR	Incremento del Riesgo Relativo
ISO	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standarization)
LyFC	Luz y Fuerza del Centro
LC50	Concentración Letal a la cual el 50% de la población muestra muere en un periodo definido
Mt	Millones de Toneladas
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NOx	Oxidos de Nitrógeno

Folio No. 006

OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
PIB	Producto Interno Bruto
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POISE	Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico
SCPC	Supercrítica con carbón pulverizado (*Supercritical Pulverized Coal*)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SETAC	Sociedad de Química y Toxicología Ambiental
SIMPACTS	Enfoque simplificado para la estimación de impactos en la generación de electricidad (*Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation)*
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SO_2	Bióxido de Azufre
VDA	Valor del Daño Ambiental
WEC	Consejo Mundial de Energía *(World Energy Council)*

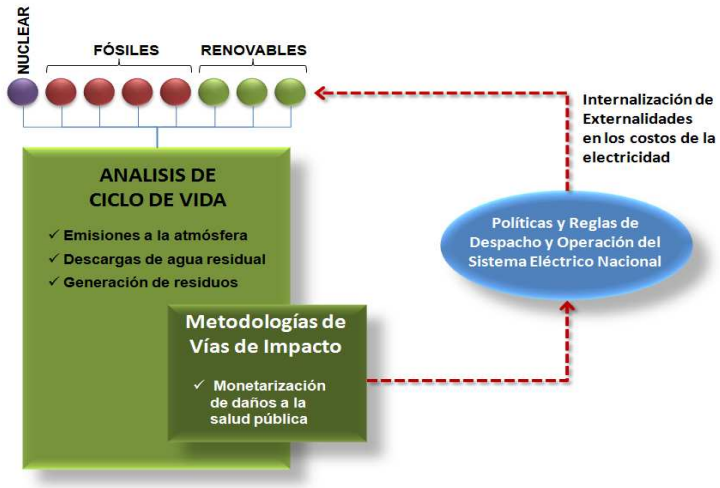
Folio No. 007

RESUMEN EJECUTIVO

En las recientes modificaciones y adiciones a la legislación que rige al sector de la energía en México, el Congreso de la Unión estableció la necesidad de considerar de una manera más integral y responsable los efectos ambientales de la energía proveniente de combustibles fósiles para promover bajo condiciones más equitativas la utilización de energías renovables y limpias. Considerados como externalidades de la actividad económica del sector energético, los costos asociados a los impactos ambientales de la industria petrolera y eléctrica nacional son rara vez cuantificados e incluidos en la estructura de costos de los combustibles o la electricidad.

Las externalidades ambientales y sociales pueden no tener ninguna implicación directa para los agentes económicos activos en la generación, uso y aprovechamiento de energía, pero claramente generan daños y/o beneficios cuantificables económicamente para la sociedad. Por lo tanto, se estima que si los costos externos de generación de electricidad fueran internalizados, México podría tener un parque de generación más amigable con el medio ambiente y con la salud de la población. Sin embargo, es muy importante enfatizar que la internalización de estos costos en el precio de la electricidad sólo puede ser incorporada a través de instrumentos de política, ya sean regulatorios o de mercado.

El Centro Mario Molina propone que el Sector Eléctrico en México valore sus externalidades ambientales en dos pasos consecutivos y complementarios, primero mediante la aplicación de una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar los daños producidos por sus emisiones contaminantes al aire, agua y suelo, y segundo, a través de una monetarización de los daños a la salud pública y los ecosistemas mediante la aplicación de metodologías de vías de impacto.



Esquema General para la Internalización de Externalidades Ambientales en México

Para cuantificar de una manera integral y homogénea las externalidades ambientales actuales y futuras de las unidades de generación de energía eléctrica, el ACV se debe aplicar conforme a los estándares establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) y que quedaron adaptadas a nuestro país en la norma mexicana NMX-SSA-14044-IMNC-2008.[1]

La aplicación de una metodología de ACV en el sector eléctrico permitiría aprovechar las experiencias internacionales que existen para la cuantificación de externalidades ambientales locales, regionales y globales, ya que es una herramienta sólida y normalizada, a la cual se están asociando continuamente los resultados de investigaciones científicas sobre los efectos al medio ambiente y la salud pública por la generación y el uso de la energía eléctrica. Asimismo, los nuevos desarrollos tecnológicos se están evaluando y comparando a nivel mundial con base en esta herramienta.

Esta metodología puede dar cumplimiento al artículo 10 de la **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética**, como uno de los principales instrumentos de política de lucha contra el cambio climático.

[1] NMX-SSA-14044-IMNC-2008 ó ISO 14044:2006. Gestión ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices.

1. CONCEPTOS GENERALES Y ANTECEDENTES SOBRE EXTERNALIDADES

Las externalidades son fallas de mercado que tienen que ser internalizadas a través de instrumentos de política, como impuestos u otros mecanismos económicos, para procurar el bienestar público.

Desde la teoría económica, las externalidades ocurren como bienes o servicios que no pueden ser intercambiados en los mercados (por ejemplo, no existe un mercado donde adquirir mejor calidad del aire). Existen dos condiciones principales para detectar la presencia de externalidades:

> **Condición 1**. Una externalidad está presente siempre que la utilidad o la producción de un agente económico A incluya variables reales (no monetarias) cuyos valores son determinados por un agente económico B (una empresa, un ente regulador, otro individuo) sin importar el efecto que tiene sobre el bienestar de A[2]. Es importante enfatizar que no se considera una externalidad en el caso que B busque afectar deliberadamente la utilidad o producción de A[3].
>
> **Condición 2.** El agente económico B, cuya actividad afecta la utilidad o la producción de A no recibe (ni paga) compensación alguna por su propia actividad cuyo valor es igual a los beneficios (costos) del agente A.

Es decir, las externalidades están presentes cuando la utilidad o la producción de una empresa son afectadas por las decisiones de consumo o producción de otro individuo o empresa, sin recibir ninguno de los dos agentes compensación alguna por ello.

El problema de las externalidades surge cuando los individuos eligen llevar a cabo sus decisiones de consumo o producción, generando una disminución en la utilidad de otros individuos. La teoría económica nos diría que de no haber costos de transacción, los individuos que tuvieran una mayor utilidad, podrían hacer una transferencia a los que reportaran una utilidad menor derivada de esas decisiones de consumo o producción. El problema es que esas transferencias generalmente tienen costos asociados, o bien, no es deseable esta transferencia. El principio de Kaldor–Hicks[2] lo ilustra claramente “Si una serie de transferencias (compensaciones) pueden ser hechas para lograr unanimidad sobre una decisión en particular, entonces esa elección es socialmente deseable, aunque las transferencias no se realicen de hecho”.

Si el consumo o producción de un bien y servicio de un agente económico afectan la utilidad de otro en una economía donde ambos agentes asignan sus recursos de manera eficiente, existe una externalidad. El caso típico de la externalidad es el de una fábrica que descarga aguas residuales en un río que también se usa con fines recreativos. En este caso, el generador de la externalidad es la fábrica, que decide hasta qué punto

[2] Baumol, W y W. Oates. The Theory of Environmental Policy. Cambridge University Press. 1975.
[3] E. J. Mishan, pp. 342-3 en The Relationship between Joint Products, Collective Goods and External Effects, Journal of Political Economy LXXVII (May / June, 1969), 329-48.

contaminar el río, de tal forma que quien solía nadar ahora está imposibilitado de hacerlo o encuentra menos placer en hacerlo, lo que implica una utilidad menor en términos económicos. Una posible solución es eliminar por completo la descarga de aguas residuales al agua, pero podría resultar muy caro para la fábrica. Otra alternativa sería prohibir nadar en el río. Una tercera alternativa sería compensar a los nadadores por el daño que se les infringe por la descarga de aguas residuales[4]. Todas estas opciones son formas de internalizar una externalidad, pero tienen costos de transacción muy diferentes, y pueden resultar en niveles de bienestar también distintos.

Otro ejemplo es el de los bienes comunes, como la atmósfera de nuestro planeta. Un bien común es aquel que puede ser consumido sin restricciones de exclusión ni rivalidad. Es decir, todos pueden acceder a él, y el consumo de otros, no afecta el consumo propio. En el caso de la atmósfera, visto como un bien global y distribuido de manera homogénea, todos podemos consumirla; no se puede excluir a alguien para que consuma aire que está disponible para todos. Por otra parte, el consumo de un tercero no afecta el consumo propio. El problema de un bien común, como la atmósfera de nuestro planeta surge cuando ese bien no tiene definidos los derechos de propiedad.

Si los derechos de propiedad sobre un bien común no están definidos es posible que termine agotándose o deteriorándose. A este fenómeno se le conoce como “la tragedia de los comunes” o de los bienes de propiedad colectiva (tomado de la expresión en inglés: *the tragedy of the commons*). Si la atmósfera es un medio, además de un bien, donde se pueden descargar emisiones de contaminantes que generen cambios en sus funciones, como el calentamiento global, entonces el problema de distribución del bien común y su uso genera más complicaciones. Este problema se puede definir cuando la atmósfera, un bien común, ha sido utilizada por un grupo de países, como medio de descarga de bióxido de carbono, u otros gases que generan el efecto invernadero, la lluvia ácida o el agotamiento de la capa estratosférica de ozono. La descarga de estos gases que inició con la Revolución Industrial hace que hoy los países en vías de desarrollo tengan que limitar sus emisiones, pues la concentración de esos gases en la atmósfera puede tener efectos negativos en la sustentabilidad del planeta.

En 1960 Ronald Coase publicó lo que devendría en su conocido Teorema[2], que establece que independientemente de la asignación de los derechos de propiedad inicial, en la ausencia de costos de transacción, los bienes o servicios quedarán en manos de quien más los valore.

Por ejemplo, en el caso de una planta de generación de energía eléctrica que genera una externalidad a través de la emisión de bióxido de carbono, la solución tradicional asumiría que sólo la planta de generación imponga los costos que significa el daño ambiental sobre la sociedad en su conjunto, por lo que la sociedad tendría que recibir una compensación por los daños sufridos. Otra posible solución teórica es que la sociedad estuviera dispuesta a pagar para que la planta redujera sus operaciones. Ambas soluciones requieren de un intermediario que ayude a resolver este conflicto. Por lo que, tendrían que conocerse tanto los costos de mitigación de las emisiones así como los costos asociados a los daños que generan estas emisiones.

[4] Igualmente, es posible evaluar y cuantificar los daños a las especies de vida silvestre acuáticas del río o a la cancelación de una fuente de agua potable para la población.

De acuerdo con diversos estudios realizados por la Comisión Europea, las externalidades de la energía eléctrica en materia de salud y cambio climático pueden ser similares e inclusive mayores a los costos de operación de una central de generación que opera con combustibles fósiles. En este contexto y como se muestra en la Figura 1.1, las tecnologías que emplean energías renovables podrían ser competitivas con las que utilizan combustibles fósiles si el costo de la electricidad producida por estas últimas incluyera el pago por los daños que produce.

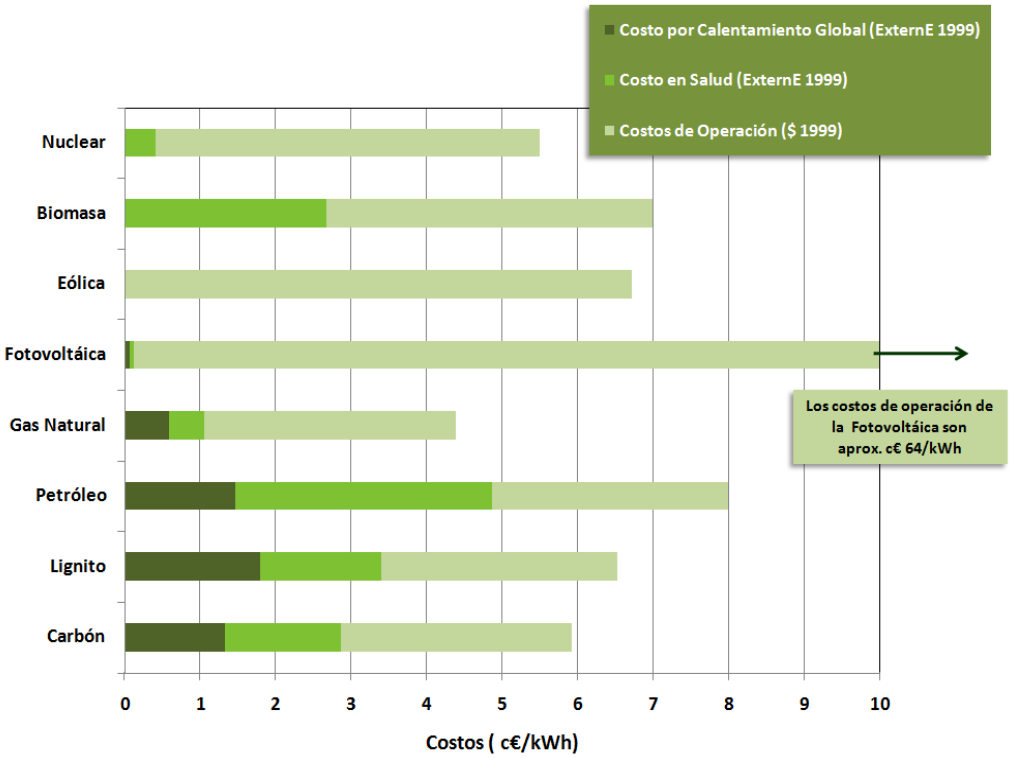


Figura 1.1. Comparación de Costos de Operación y Externalidades de la Electricidad producida en Alemania

Fuente: Asociación Australiana de Ciencia e Ingeniería Tecnológica, 2009[5]

La nueva **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición** indica en su artículo 10 lo siguiente:

> ***Artículo 10.-*** *La Secretaría de Energía, con la opinión de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y de la Secretaría de Salud, elaborará una* ***metodología para valorar las externalidades asociadas con la generación de electricidad, basada en energías renovables****, en sus*

[5] Tomado de: Maddox, B, Scaife, P, and Wibberley, L, 2004, *Externalities: A Complementary Tool for Impact Assessment*, Co-operative Research Centre for Coal in Sustainable Development, BHP Billiton, Technical Note 15, Pullenvale, Qld, julio, pág. 44.

Folio No. 0012

> *distintas escalas, así como las acciones de política a que se refiere esta Ley, relacionadas con dichas externalidades. A partir de esa metodología y acciones de política, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales diseñará mecanismos de regulación ambiental para el aprovechamiento de energías renovables.*

La valoración de externalidades es útil en la definición de políticas económicas y su aplicación en nuestro país conllevará diversos beneficios. Con base en lo especificado por la nueva **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición** y las consideraciones realizadas por David Pearce[6], pionero de la economía ambiental en el Reino Unido y a nivel mundial, se pueden decir que en México la valoración de las externalidades ambientales puede servir para:

- ✓ Tomar decisiones de inversión en el sector Energía que garanticen que el costo social y ambiental de la electricidad está considerado totalmente en la planeación de futuras ampliaciones de la capacidad instalada.
- ✓ Incorporar adecuadamente en la Cuentas Nacionales los costos del daño ambiental y la depreciación de nuestros recursos naturales derivados de la generación y uso de la energía eléctrica.
- ✓ Incrementar la conciencia social y política sobre los graves problemas ambientales derivados de la energía, ya que los sistemas energéticos presentan ineficiencias económicas que hay que corregir.
- ✓ Fijar prioridades en las políticas ambientales de tal suerte que se apliquen aquellas políticas con las que se puedan obtener beneficios netos sin provocar daños al medio ambiente y la salud pública.
- ✓ Actualizar las reglas de despacho y operación del sistema eléctrico nacional, de tal forma que no se mantengan las desventajas de las energías renovables al no incorporar los costos reales del uso de combustibles fósiles.
- ✓ Programar el presupuesto del sector Energía considerando las inversiones necesarias para reducir los impactos ambientales y a la salud pública.
- ✓ Diseñar y estimar adecuadamente el valor de futuros impuestos ambientales.

[6] Pearce, D, 2001, *Energy Policy and Externalities: An Overview, Workshop on Energy Policy and Externalities: the Life Cycle Analysis Approach*, OECD Agencia de Energía Nuclear, Paris, 15-16. Noviembre 2001, pp.23-44.

2. METODOLOGÍAS Y ESTUDIOS INTERNACIONALES DE VALORACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES

2.1. Metodología de la Directiva Europea de Valoración de Externalidades (ExternE)

El proyecto europeo ExternE y su sucedáneo NEEDS (acrónimo del nombre en inglés *New Energy Externalities Development for Sustainability*) han derivado en el conjunto más completo y avanzado a nivel internacional de procedimientos y metodologías para el cálculo de las externalidades ambientales de la generación de energía eléctrica. Los resultados de este proyecto son ampliamente respetados por la comunidad científica internacional especializada en el tema y se constituyen como una referencia mundial obligada.

Este proyecto surgió de un acuerdo de colaboración celebrado en 1991 entre el Departamento de Energía de los Estados Unidos y la Comisión Europea. Aunque el gobierno de los Estados Unidos no siguió apoyando el proyecto, la Unión Europea continuó su desarrollo y expansión hasta febrero de este año 2009, reconociendo la valoración de las externalidades de la producción y uso de la energía como una de sus tareas. El proyecto provee un marco de referencia para transformar los impactos ambientales directos e indirectos de la generación de energía eléctrica, medidos en unidades de notación científica, en índices o indicadores de entendimiento común, como es el valor monetario o los ecoindicadores.

El proyecto se basa en más de 20 años de valoración del daño ambiental en los países desarrollados, así como en el trabajo específico de más de 66 socios (universidades, institutos de investigación, ONGs e industrias) de 27 países, principalmente europeos, valorando los costos y beneficios de políticas energéticas, nuevos sistemas energéticos o tecnologías para producir electricidad y diversos aspectos relacionados con la soberanía energética de Europa.

La compilación metodológica más reciente del proyecto ExternE data del año 2005, pero se ha actualizado por líneas de investigación específicas en el marco del proyecto NEEDS. La metodología denominada *ExternE-2005*, utiliza una aproximación *bottom-up* (de abajo hacia arriba) para estimar los impactos de las emisiones provenientes de las plantas de generación de energía eléctrica y del proceso de extracción, preparación y transporte de los combustibles. Para ello requiere de un inventario completo de emisiones contaminantes, la modelación de la dispersión de esos contaminantes en el ambiente, el análisis de los impactos a la salud pública basados en la relación dosis-respuesta (medidos en pérdida de años de vida) y la valoración económica de los impactos locales y regionales. Los impactos globales sólo se miden para el fenómeno de cambio climático y los costos estimados están relacionados con los costos de mitigación de gases de efecto invernadero.

Los inventarios elaborados en el proyecto NEEDS por proceso tecnológico y categoría de impacto ambiental, con base en un análisis de ciclo de vida, así como el modelo EcoSense para el cálculo de externalidades de las emisiones atmosféricas de una planta de generación de energía eléctrica en Europa, están disponibles en la Internet de manera gratuita para los socios del proyecto y mediante una pequeña cuota para el público en general.

Se listan a continuación los pasos tomados en la internalización de los costos a través de instrumentos de política:

Paso 1. Definición de la actividad a ser analizada y el escenario de referencia, así como definición de las categorías de impacto y las externalidades.

Paso 2. Estimación de los impactos o efectos de la actividad (en unidades físicas y notaciones científicas). En general los impactos asignados a la actividad son la diferencia entre un escenario base (sin actividad) y un escenario impactado (con actividad).

Paso 3. Valoración económica de los impactos asociados a costos externos.

Paso 4. Análisis de sensibilidad.

Paso 5. Análisis de resultados.

Esta metodología incluye tres categorías de impacto: calentamiento global, accidentes (ej. accidentes nucleares) e impactos ambientales. Cada categoría es abordada bajo diferentes enfoques. Dada la gran incertidumbre que existe para la valoración de los impactos del calentamiento global se utiliza el enfoque del costo de prevención o mitigación. En cuanto a los accidentes, se hace una distinción entre los riesgos de accidentes públicos y los laborales; los públicos pueden ser evaluados al describir los posibles accidentes, calcular el daño y multiplicarlos por la probabilidad de que ocurran.

Para cuantificar los impactos ambientales, se utiliza el enfoque de vías de impacto. Este enfoque está dividido en 4 etapas principales:

Etapa 1. Emisión. Donde se hace una especificación del tipo de combustible, tecnología de generación de energía eléctrica y emisiones contaminantes de gases y partículas.

Etapa 2. Dispersión. Se analiza el entorno geográfico y ambiental para determinar el incremento de las concentraciones contaminantes en las regiones afectadas.

Etapa 3. Impacto. En esta etapa se utilizan modelos ecológicos y epidemiológicos de dosis-respuesta, para estimar los daños a la biodiversidad, los ecosistemas y la salud pública en morbilidad (mayor incidencia de enfermedades) y mortalidad.

Etapa 4. Costo. Finalmente se asigna un valor monetario a los impactos ambientales identificados y cuantificados en las etapas anteriores.

Los impactos en la salud pública representan la mayor parte de la estimación de daños de la metodología ExternE. Existe un consenso de que la contaminación del aire aumenta la morbilidad, en términos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y conduce a la mortalidad prematura. De este tipo de análisis se ha obtenido como conclusión que el costo más importante asociado a la generación de energía eléctrica proviene de la mortalidad crónica asociada a las partículas. Sin embargo, para obtener valores de los

impactos de acidificación, eutroficación y calentamiento global, así como para darles un valor monetario, esta metodología todavía no puede ser aplicada completamente por falta de datos o porque la estimación de los impactos físicos a la biodiversidad y los ecosistemas terrestres y acuáticos es aún limitada.

La Figura 2.1 ilustra las etapas descritas del enfoque de vías de impacto, empleando como ejemplo una planta de generación de energía eléctrica que emite gases contaminantes a la atmósfera:

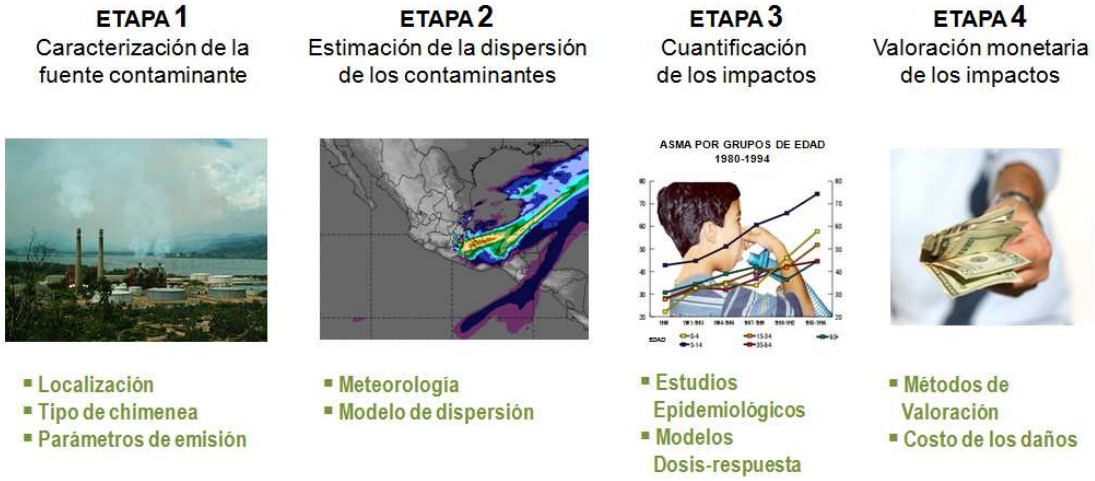


Figura 2.1 Etapas principales del enfoque de vías de impacto, para el caso de contaminación del aire

Fuente: CMM, basado en *ExternE-2005*

Los resultados reportados por la aplicación de esta metodología en Europa han generado diversas discusiones debido a su incertidumbre. Las fuentes de dicha incertidumbre están relacionadas con la veracidad y representatividad de los datos utilizados, los modelos matemáticos empleados (donde se realizan diversos supuestos en relación a la interacción entre la contaminación del aire y la salud pública, la función dosis-respuesta en humanos y animales o la dispersión de contaminantes en diversos medios: aire, agua, suelo, etc.), la aplicación de supuestos económicos generales (tasa de descuento, valor estadístico de la vida, entre otros), opciones políticas y éticas en el análisis. Sin embargo, siempre será necesario adoptar algunos supuestos, por lo cual el nivel de incertidumbre no puede ser eliminado por completo.

El desarrollo de la metodología ExternE es un primer ejercicio para la reducción de la incertidumbre y falta de información en cuanto a la valoración de las externalidades. Asi mismo, esta experiencia fue clave para definir elementos de política, como el desarrollo de la Convención sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza de Largo Alcance, así como el Esquema Europeo de Comercio de Emisiones, que permitieran, a través de instrumentos económicos, reducir las emisiones generadas por el sector, incluyendo un mecanismo de incentivos, como son los bonos de carbono.

2.2. Metodología Eco-indicador 99

El Eco-indicador 99 es una herramienta para la evaluación de los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a partir de datos obtenidos en un Análisis de Ciclo de Vida. Esta metodología fue confeccionada en 1999 por la empresa *PRé Consultants* para el Ministerio Holandés de Planeación Urbana, Vivienda y Medio Ambiente, como parte de su política orientada a la Gestión Ambiental[7]. En su elaboración se conformó un equipo de expertos suizos y holandeses en análisis de ciclo de vida, contando con la participación del Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente, así como el apoyo recibido para el equipo suizo por parte del Programa Prioritario de Medio Ambiente de la Fundación Nacional Suiza de Ciencias. Asociado a esta metodología, la misma empresa desarrolló un programa de cómputo denominado *SimaPro* para realizar el análisis de ciclo de vida.

Lo relevante de ambas herramientas es que se han aplicado en Suiza para definir el nivel de sustentabilidad de la electricidad vendida en ese país, de tal suerte que se considera "electricidad verde" a la proveniente de una planta de generación cuya calificación, de acuerdo al Eco-Indicador 99, sea de sólo un tercio del valor de una planta de gas natural en ciclo combinado (NGCC)[8]. La electricidad que tenga esta característica se puede comercializar a un precio superior.

Esta metodología se basa en la cuantificación numérica de cada impacto ambiental detectado y su ponderación con base en coeficientes que permiten obtener un valor numérico adimensional denominado "Eco-indicador". Entre más alto es el valor del Eco-indicador mayor es el impacto ambiental.

El valor adimensional de los Eco-indicadores está normalizado para Europa y se denomina "punto Eco-indicador" o Pt. La escala elegida permite suponer que un Pt representa una milésima parte de la carga ambiental total de un ciudadano europeo medio, es decir, es el resultado de dividir la carga ambiental total en Europa entre el número total de sus habitantes multiplicado por mil. Todos los Eco-indicadores normalizados están actualizados y validados para Holanda, más concretamente para Rotterdam.

Para obtener este valor adimensional es necesario seguir los siguientes tres pasos, mismos que se ilustran en la Figura 2.2:

Paso 1. Inventario de las emisiones relevantes, la extracción de minerales y combustibles fósiles (recursos) y el uso y transformación de suelo de todos los procesos incluidos en el Ciclo de Vida del producto o servicio. Esto forma parte del Análisis de Ciclo de Vida.

Paso 2. Cálculo y análisis de los daños que pueden causar esas emisiones a la salud humana, a la calidad de los ecosistemas y a los recursos (se aplica un conjunto de modelos de daño).

[7] Tomado del sitio de Internet de la empresa Pré Consulting el 12 de mayo de 2009: http://www.pre.nl

[8] R. Wüstenhagen, J. Markard y B. Truffer, 2000. *Green Electricity in Switzerland: Insights in market development and eco-labelling*. Reporte preparado para la conferencia "*Consumer-driven green electricity in competitive electricity markets*"realizada en Copenhagen, el 22 y 23 de mayo del año 2000.

Paso 3. Ponderación de las tres categorías de daño, mediante una normalización en el contexto regional del análisis (ej. Europa).

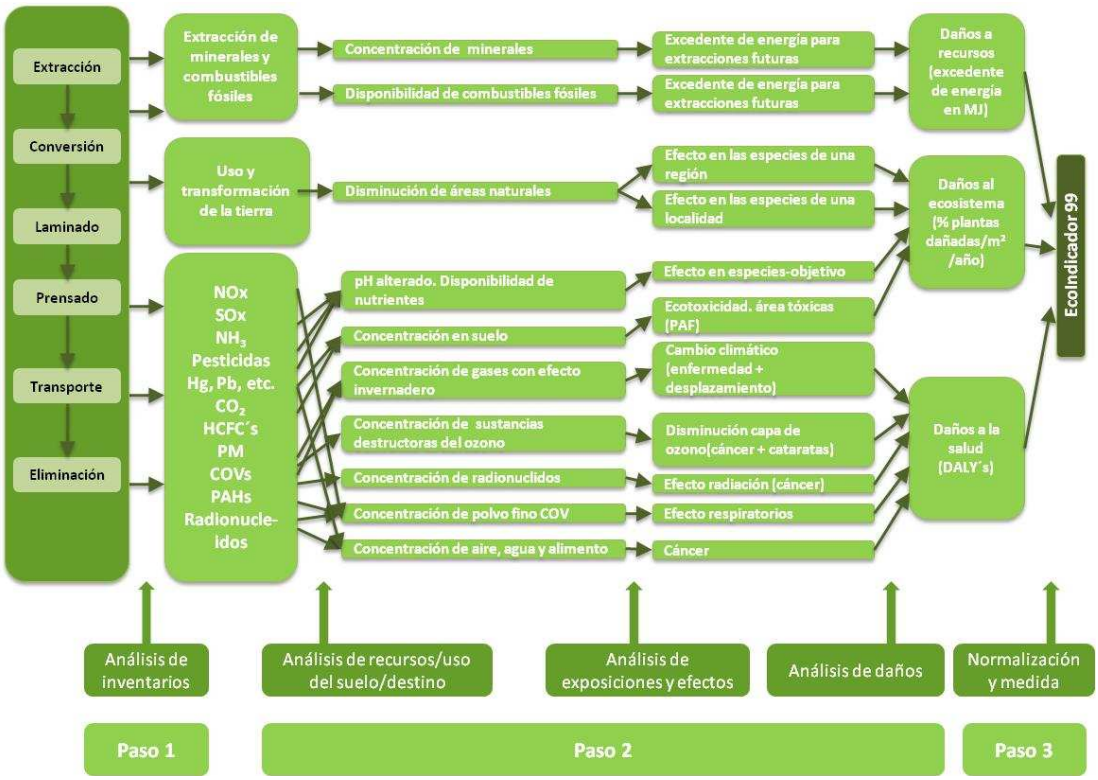


Figura 2.2 Esquema general para el cálculo de los Eco-indicadores

Fuente: Eco-indicator 99. October 2000[9]

Los inventarios se desarrollan para las actividades típicas de un producto o servicio en su ciclo de vida, a saber: extracción de materiales, procesos de producción, transporte, procesos de generación de energía y disposición de residuos.

Los inventarios que se desarrollan para la generación de energía se refieren a la extracción y la producción de combustibles, conversión energética y generación de energía eléctrica. Para esto se toman en cuenta los diferentes tipos de combustibles utilizados en Europa y se definen Eco-indicadores de alto y bajo voltaje, utilizados para valorar de manera distinta los procesos industriales, el uso domestico o a las pequeñas empresas.

En el Paso 2 se aplican modelos de daño, los cuales se basan en los inventarios y permiten calcular el impacto que pueden causar cada una de las actividades descritas

[9] Eco-indicator 99 A damage orientes method for Life Impact Assessment. Manual for Designers. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. October 2000

detalladamente en el Paso 1. Los daños finalmente se agrupan en la extracción de recursos, el uso y transformación de la tierra y la emisión directa de contaminantes, de acuerdo con las siguientes consideraciones:

Extracción de minerales y combustibles fósiles (recursos). Toma en cuenta que al extraer minerales se reduce la calidad de los recursos restantes o se dificultará más su extracción, por lo que será necesario en un futuro emplear más esfuerzo para extraer los que queden, este esfuerzo se denomina como "excedente de energía".

Uso y transformación de la tierra. Considera la desaparición de especies y los efectos provocados por el uso del suelo.

Emisiones. Se analiza el destino final de los contaminantes emitidos, la exposición de la población o los ecosistemas a los mismos y los efectos causados por ellos.

La ponderación es el último paso y el más crítico, siendo éste el punto de partida para el desarrollo de la metodología del Eco-indicador 99. La ponderación se realiza para tres tipos distintos de daño:

- **Daños en la salud humana:** se incluye el número y la duración de las enfermedades y los años de vida perdidos debido a la muerte prematura por causas ambientales. Se expresan en DALYs (años de vida sometidos a una discapacidad). Estos daños a la salud pública provienen de impactos ambientales como el cambio climático, la disminución de la capa de ozono, la radiación iónica o la respiración de compuestos contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- **Daños a la calidad del ecosistema:** en esta categoría se incluye el efecto sobre la diversidad de especies. Se expresan como el porcentaje de especies desaparecidas en un área concreta o fracción potencialmente desaparecida (PDF, por sus siglas en inglés), a causa de la carga medioambiental, la cual se multiplica por el tamaño del área y el período de tiempo que tarda en darse el daño. Este daño al ecosistema proviene de la ecotoxicidad, acidificación, eutroficación y transformación del suelo, todos ellos fenómenos provocados o acelerados por la emisión o descarga de contaminantes de la planta de generación de energía eléctrica.
- **Daños a los recursos:** en esta categoría se incluye la necesidad extra de energía requerida en el futuro para extraer minerales y recursos fósiles. Se expresa como el "excedente de energía" para extracciones futuras.

Con las herramientas desarrolladas por la empresa *PRé Consultants* no es posible monetarizar de manera automática los puntos Eco-indicador 99. Los valores promedio que se han obtenido con esta metodología para la generación de electricidad con diversas fuentes de energía en Europa occidental se muestran en la Tabla 2.1. Estos valores se pueden a su vez subdividir en las causas que provocan los daños cuantificados, como se ilustra más adelante en la Figura 2.3.

Folio No. 0019

Tabla 2.1 Valores Promedio del Eco-Indicador 99 para la generación de electricidad[10]

Tecnología de generación de energía eléctrica	Eco-Indicador99 µPt/kWh
Hidroelectricidad	502
Eólica	5,420
Nuclear	6,260
Solar Fotovoltaica	12,865
Gas Natural en Ciclo Combinado	27,900
Carbón	61,600

Fuente: Eco-indicador 99

La Figura 2.3 muestra los resultados obtenidos de aplicar el Eco-indicador 99 para diferentes tecnologías de generación eléctrica en diversos países europeos. En la gráfica se observa claramente la diferencia entre la electricidad proveniente de plantas que emplean energía nuclear o energías renovables y aquellas que utilizan combustibles fósiles, siendo la extracción y quema de éstos los que causan un mayor daño al ambiente.

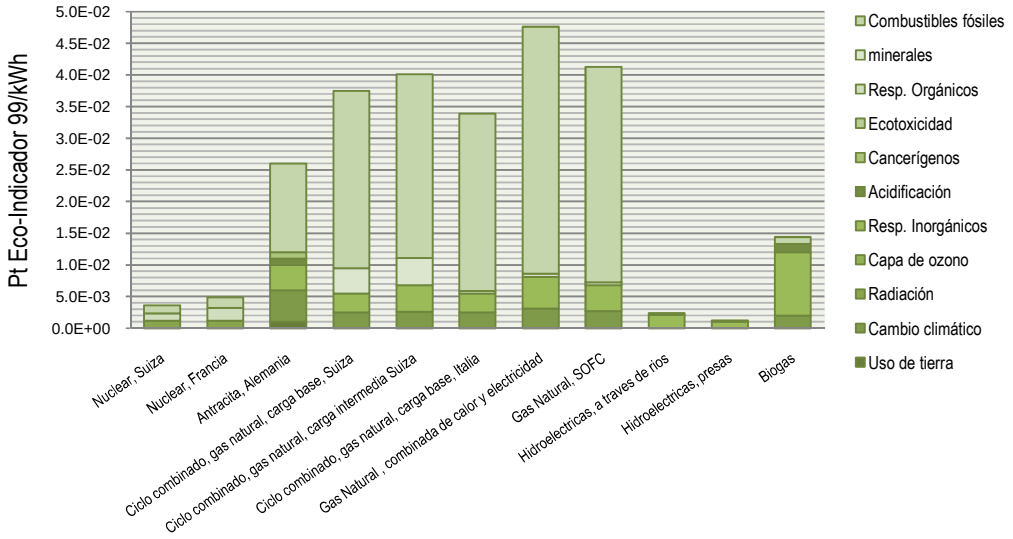


Figura 2.3 Comparación de diversas plantas de generación de energía eléctrica en Europa con base en el Eco-Indicador 99

Fuente: Instituto "Paul Scherrer" de Suiza, 2007

[10] R. Frischknecht y N. Jungbluth, 2000. *Globale Umweltkriterien für Ökostrom*. Reporte elaborado por *ESU-services* para la Asociación Suiza para la Electricidad Ambientalmente Sustentable.

2.3. Comparación de los Sistemas de Energía utilizando el Ciclo de Vida, reporte especial del *World Energy Council* (WEC)[11]

El Consejo Mundial de Energía (WEC, por sus siglas en inglés) llevó a cabo durante el periodo 2002 – 2004, una compilación de estudios de análisis de ciclo de vida de diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica desarrollados en los últimos 15 años a nivel internacional. Estos análisis consideraron la cadena completa de producción de energía de la exploración y la extracción a la transformación, almacenamiento, transporte, transformación en combustibles secundarios y uso final; es decir, la energía primaria desde su origen hasta su uso final. Esta compilación permitió determinar:

1. **Accesibilidad:** costos directos de la energía.
2. **Disponibilidad:** seguridad y fiabilidad del suministro de energía.
3. **Aceptabilidad:** impactos ambientales y externalidades.

De acuerdo a los resultados de este meta-análisis existe una importante contribución de contaminantes a la atmósfera por *emisiones directas* originadas en las chimeneas de las centrales de generación eléctrica, principalmente si es generada a partir de combustibles fósiles. Las *emisiones indirectas* son aquellas provenientes de la extracción de materias primas, la fabricación de componentes, combustible y su transporte, así como por la construcción y el desmantelamiento de las instalaciones.

El nivel de estas emisiones contaminantes depende de la mezcla de combustible y la tecnología utilizada; así como al nivel de potencia de la unidad de generación, es decir, si opera a una potencia constante o variable, por ejemplo. Sin embargo, la contribución de las etapas iniciales -la producción de combustible y su transporte- representa en la mayoría de los ciclo del combustible, entre un 10 y un 15% del total de las emisiones.

Los contaminantes mayormente emitidos son bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), aerosoles primarios y secundarios, óxidos de nitrógeno (NOx), el bióxido de azufre (SO_2), partículas sólidas y gases de efecto invernadero (GEI). Por lo que, los países que basan su generación en combustibles fósiles tienen mayores emisiones en comparación con aquellos que dan preferencia a las energías renovables.

En las Figuras 2.4 y 2.5 se aprecia una comparación de las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica relacionadas con las emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo al ACV. Estas emisiones muestran que las provenientes de chimeneas, es decir, las consideradas como emisiones directas al aire representan más del 80% de las emisiones de CO_2e.

[11] World Energy Council, 2004. *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment.*

Folio No. 0021

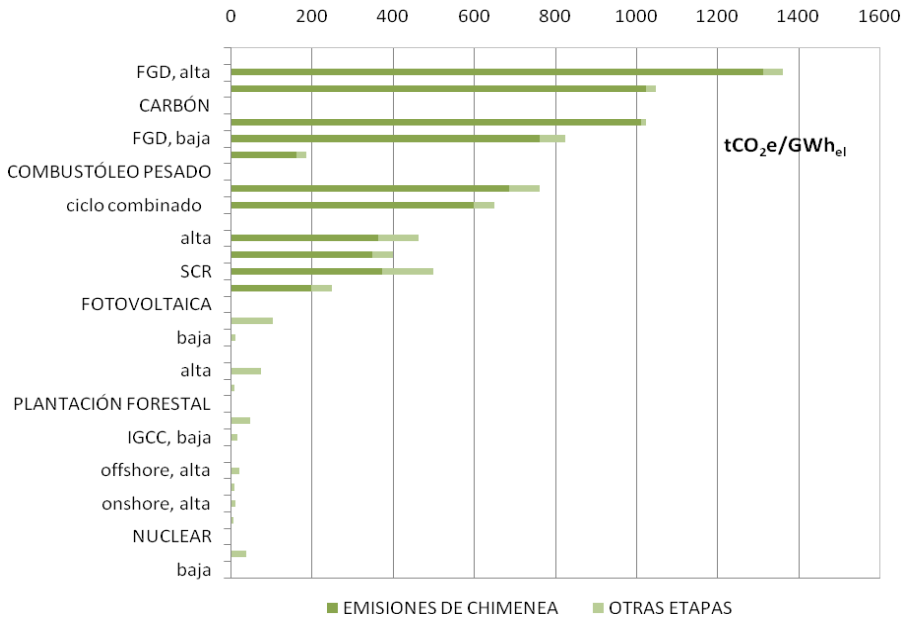


Figura 2.4 Emisiones comparativas de CO_2e en la generación de electricidad con diferentes tipos de tecnologías mediante ACV

Fuente: WEC, 2004

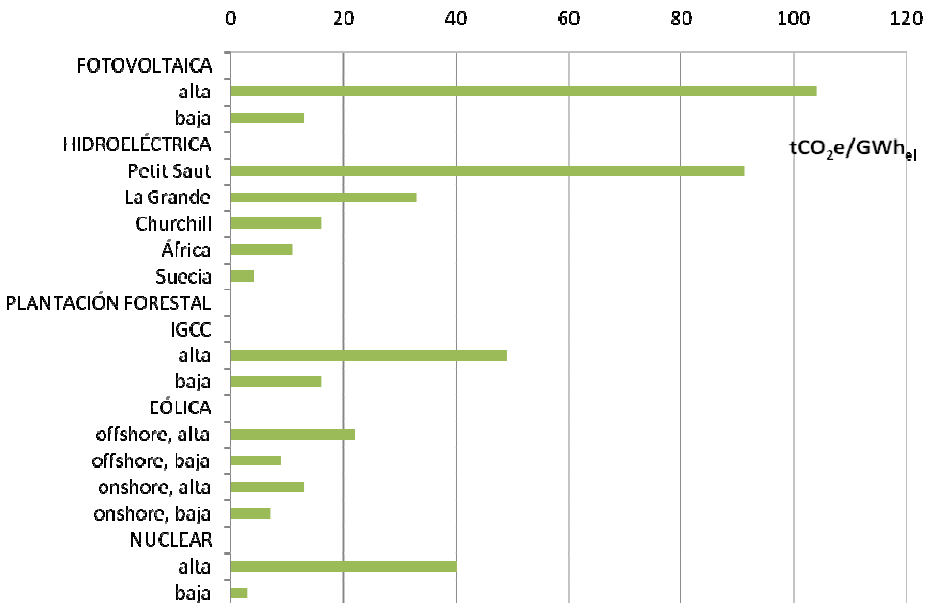


Figura 2.5 Emisiones comparativas de CO_2e en la generación de electricidad con tecnologías renovables mediante ACV

Fuente: WEC, 2004

Las emisiones indirectas son aquellas que se generan previamente a la operación de las unidades durante la extracción y preparación del combustible, fabricación de estructuras, equipos y componentes, construcción y transporte, y una vez terminada su operación, el desmantelamiento de la misma.

El análisis del ciclo de vida permite identificar de igual manera, los impactos directos e indirectos a la salud de la población y los ecosistemas; además de incluir en la evaluación parámetros como la disponibilidad de tierra según las necesidades de cada tecnología fósil o renovable. Ésta última demandante de mayores extensiones como en el caso de la eólica o la solar, en comparación con las de tecnologías tradicionales. Sin embargo, esta comparación es relativa como en el caso de las hidroeléctricas, las cuales tienen usos alternos como el control de inundaciones, el suministro de agua de riego, la pesca o la realización de actividades recreativas.

Dadas estas diferencias, el WEC propone comparar las diferentes opciones de generación eléctrica calculando el **tiempo de amortización energética del ciclo de vida,** el cual se define como el tiempo necesario para que la unidad de generación eléctrica produzca una cantidad de energía eléctrica igual a la utilizada para su construcción, mantenimiento y suministro de combustible. Otra forma es calcular el **coeficiente de amortización del ciclo de vida de la energía**, es decir, la relación de la energía producida por la red eléctrica con respecto a la energía necesaria para construir, mantener y alimentar la planta de generación durante su vida útil.

Asimismo, con respecto a la naturaleza y la escala de los impactos ambientales producidos por las diferentes fuentes de energía, existen elementos característicos de las fuentes primarias que son clave para la toma de decisiones, por lo que el ACV juega un papel importante para su definición, tal como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Elementos característicos de las fuentes de energía primaria basados en estudios de ACV

Factores para la toma de decisiones	Combustión basada en				Nuclear	Hidro	Eólica	Solar
	Carbón	Petróleo	Gas	Biomasa				
Accesibilidad	F	M	M	M	F	F	D	D
Disponibilidad	F	M	M	M	F	F	D	D
Aceptabilidad	D	D	M	F	F	F	F	F

De acuerdo al ranking de factores de importancia 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.**

Fuente: WEC 2004

Este meta-análisis menciona la importancia de tomar en cuenta en la decisión de los sistema de energía a utilizar, otros factores como el potencial de largo plazo de los impactos causados por el incremento de GEI, el progresivo agotamiento de los recursos

energéticos primarios por su explotación y el favorecimiento de impactos ambientales generados por dicha actividad. Además de incluir otros criterios de decisión tales como costos y desempeño de las unidades de generación de energía eléctrica.

El estudio realizado por el WEC especifica que es posible estimar con cierta exactitud las emisiones de CO_2, NOx, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, nanopartículas; así como emisiones térmicas y generación de residuos sólidos; sin embargo, sus impactos dependen de la ubicación, el receptor y la magnitud de la operación. El impacto de las emisiones térmicas en el mar es muy diferente al que pudiera generarse en aguas continentales o bien, los impactos de la mala calidad del aire en zonas poco pobladas difieren en órdenes de magnitud en relación a las zonas urbanas. Por este motivo, la comparación entre estudios de ciclo de vida para la generación de energía eléctrica se debe de realizar en forma muy cuidadosa y tratando de no extrapolar valores de un país a otro. Como la mayor parte de los estudios analizados por el WEC se hicieron en países desarrollados del hemisferio norte, donde las condiciones socioeconómicas y ambientales son parecidas, la comparación es relativamente válida. Las principales categorías de impacto evaluadas por las distintas experiencias analizadas por el WEC se describen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Categorías de impacto más significativas en la producción de energía

Factores para la toma de decisiones	Combustión basada en				Nuclear	Hidro	Eólica	Solar
	Carbón	Petróleo	Gas	Biomasa				
Agotamiento de Recursos	X	X	X	X	X			
Uso de suelo, impacto visual	(X)		X			X	X	X
Regulación del curso de agua						X		
Emisión térmica	X	X	X	X	X			
Ruido							X	
Radiación					X			
Calidad del aire	X	X	X	X				
Acidificación	X	X	X	X				
Eutroficación	X	X	X	X				
GEI	X	X	X	X				

Fuente: WEC 2004

El ACV identifica la etapa del ciclo de vida de la generación de energía eléctrica que presenta los principales problemas ambientales, además de tener la ventaja de permitir analizar las emisiones generadas tanto por las energías fósiles como por las renovables, incluida la nuclear, aún cuando éstas últimas no tienen emisión de chimeneas.

2.4. Evaluación de las externalidades ambientales de la Generación Termoeléctrica en México (CEPAL)

Este estudio, publicado en noviembre de 2004, se realizó en el marco del Convenio de Colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Tuvo como objetivo estimar las externalidades de la generación de energía eléctrica en México a partir de combustibles fósiles, considerando los impactos en la salud y el medio ambiente a nivel regional y global.

Para esta evaluación se seleccionaron 11 zonas, donde se encuentran ubicadas 13 de las mayores plantas de generación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que utilizan combustóleo o carbón como combustible. Estas plantas están ubicadas en las localidades de Río Escondido, Manzanillo, Tuxpan, Petacalco, Puerto Libertad, Mazatlán, Samalayuca, Tula, Salamanca, Altamira y Rosarito; estas cuatro últimas caracterizadas como "Zonas Críticas" de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994.

Las externalidades de estas centrales termoeléctricas fueron evaluadas utilizando la versión simplificada de la metodología de Vías de Impacto del proyecto *ExternE* de la Unión Europea, además del modelo *Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation* (SIMPACTS) desarrollado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Para efectos de la metodología de Vías de Impacto se utilizaron datos técnicos, de salud, medio ambiente y económicos del año 2000 como referencia. Además de las siguientes actividades:

a. **Caracterización de la fuente emisora**: localización específica de la planta de generación (urbana o rural), coordenadas geográficas, características físicas e inventario detallado de contaminantes emitidos.

b. **Dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones:** dispersión de contaminantes a nivel local y alrededor de un radio de 50 km.

c. **Evaluación de los impactos:** determinación de los impactos ambientales por la generación eléctrica, con base en:

   Funciones exposición–respuesta: Determinación por medio de estudios clínicos o epidemiológicos, el impacto físico observado en la salud de la población, en función de concentración de contaminantes presentes en el aire. La respuesta en los seres humanos es medida de acuerdo al número de ataques de asma, visitas a hospitales, ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, reducción en la expectativa de vida, entre otros). En los ecosistemas a través de la acidificación, daño en la vegetación o reducción del proceso de fotosíntesis; y en lo económico, por la corrosión de metales o materiales, edificaciones y o cosechas agrícolas.

   Cálculo de los impactos: Estimación a partir de valores como la mortalidad y la morbilidad.

d. **Evaluación monetaria:** Estimación de costos unitarios de las externalidades expresados en dólares por año. Estos pueden ser costos directos asociados a la enfermedad, gastos preventivos y valoración contingente.

Folio No. 0025

El modelo SIMPACTS está integrado por tres principales módulos, el AIRPACTS, el NUCKPACTS y el HYDROPACTS. El AIRPACTS calcula el impacto ocasionado en la salud humana, las cosechas agrícolas y los materiales a consecuencia de su exposición a la contaminación ambiental.

De las 13 plantas de generación evaluadas se analizaron las emisiones de partículas, bióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NOx). El impacto en la salud se realizó mediante el análisis de los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) tomando el valor más bajo para cada impacto con el fin de realizar una estimación conservadora del daño.

Del estudio se obtuvo como resultado que las mayores concentraciones de contaminantes fueron encontradas en la zona de la central termoeléctrica de Tula, subsecuentemente, Mazatlán, Salamanca, Altamira, Petacalco, Río Escondido, Manzanillo, Rosarito y Tuxpan, salvo Río Escondido-Carbón II, sin embargo se encontró que el valor máximo de las concentraciones promedio anual de NOx se encuentran por debajo de la norma, también se encontró que en el total de los daños ocasionados a la población, la mayor participación es debida al SO_2 y sólo en tres centrales se presentaron los valores más altos por tonelada emitida de PM_{10} y SO_2.

Para la evaluación económica de las externalidades se consideraron los costos externos del impacto en la salud, los cuales referidos al año 2000, fueron del orden de 465 millones de dólares anuales, equivalentes al 0.1% del Producto Interno Bruto y al 4% del gasto público en salud. De acuerdo a este estudio si se internalizaran las externalidades por las emisiones de SO_2 implicaría un aumento entre 0.12 y 0.83 centavos de dólar por kWh, que ponderado a la generación de las 13 centrales evaluadas fue de 0.50 centavos de dólar por kWh.[12]

Buscó evaluar las externalidades derivadas de la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas en México, para lo anterior se utilizó la versión simplificada de la Metodología de Vías de Impacto del proyecto *ExternE* de la Unión Europea, así como el modelo *Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation* (SIMPACTS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). La Metodología de Vías de Impacto está dividida en cuatro etapas: caracterización de la fuente emisora, dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones, evaluación de los impactos y, por último, la evaluación monetaria.

Este estudio muestra cómo es posible aplicar la metodología *ExternE-2005* en nuestro país e ilustra claramente la necesidad de hacer un esfuerzo mayor para llenar los vacíos de información, principalmente los relativos a estudios epidemiológicos locales que asocian contaminación con morbilidad y mortalidad, así como estudios científicos sólidos sobre las alteraciones que sufren los ecosistemas característicos del territorio nacional por el vertimiento de contaminantes.

[12] SEMARNAT-CEPAL, 2004. Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En las últimas décadas las empresas y la sociedad han tomado conciencia acerca del agotamiento de los recursos naturales y la degradación ambiental, por lo cual se está buscando la manera de reducir los efectos negativos que pueden tener los productos o servicios ofrecidos. El primer intento para evaluar estas implicaciones fueron los estudios de impacto ambiental seguidos de las evaluaciones ambientales de los procesos asegurando así, que el proceso de producción cumple con los niveles mínimos requeridos de prevención de la contaminación.

En 2002, a partir de la revisión de la Agenda de Desarrollo Sustentable en África, se dio a conocer que los impactos ambientales de un producto o servicio no solo provenían de las operaciones industriales sino también de la forma de consumo y gestión del producto, de los procesos implicados y de los servicios requeridos, surgiendo así el uso del "Análisis de Ciclo de Vida" (ACV) en las evaluaciones del consumo y producción sustentables[13].

Sin embargo, el ACV tiene más de 35 años de evolución como una herramienta para evaluar los impactos ambientales totales involucrados en un proceso. El primer estudio fue realizado en 1969 por Coca-Cola para analizar sus empaques de bebidas gaseosas. Los primeros estudios de comparación ecológicas de productos fueron realizados en Suiza en 1974 y eran llamados *ecobalance.* Posteriormente en 1984 la Agencia Suiza de Protección al Medio Ambiente publicó una propuesta de metodología para evaluar las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de empaques. A través de los ecobalances se elaboró una estructura para obtener el inventario, calcular y comparar datos dentro de la metodología de ACV.

El primer taller de metodología de ACV fue en el año de 1990 por la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC) en Vermont. Posteriormente SETAC estableció reglas para el ACV que fueron aprobadas internacionalmente creándose en 1993 el *código de práctica* en Portugal. La Organización Internacional de Estandarización (ISO) se responsabilizó de generar un consenso internacional basado en el entendimiento científico para el ACV, creando en 1997 la norma ISO 14040, la cual fue aprobada en 60 países.

En años recientes, el PNUMA y SECTA han buscado unificar las metodologías utilizadas alrededor del mundo en las fases de inventario de ciclo de vida, evaluación de impacto de ciclo de vida y la administración, por medio de la llamada *Iniciativa de Ciclo de Vida*. Esta iniciativa permitirá establecer las bases para que la metodología de ACV sea utilizada de una forma práctica en todo el mundo para todos los sectores de productos y servicios a partir del ISO 14040[14]. En la Figura 3.1 se muestra la evolución del ACV antes descrita.

[13] Un nuevo nivel de evaluaciones ambientales: El ACV. Amalia Sojo, Mireya González y Nydia Suppen.
[14] Conceptos básicos del ACV y su aplicación en el Ecosdiseño. Nydia Suppen y Bart van Hoof. Centro de ACV y diseño sustentable.2005

Folio No. 0027

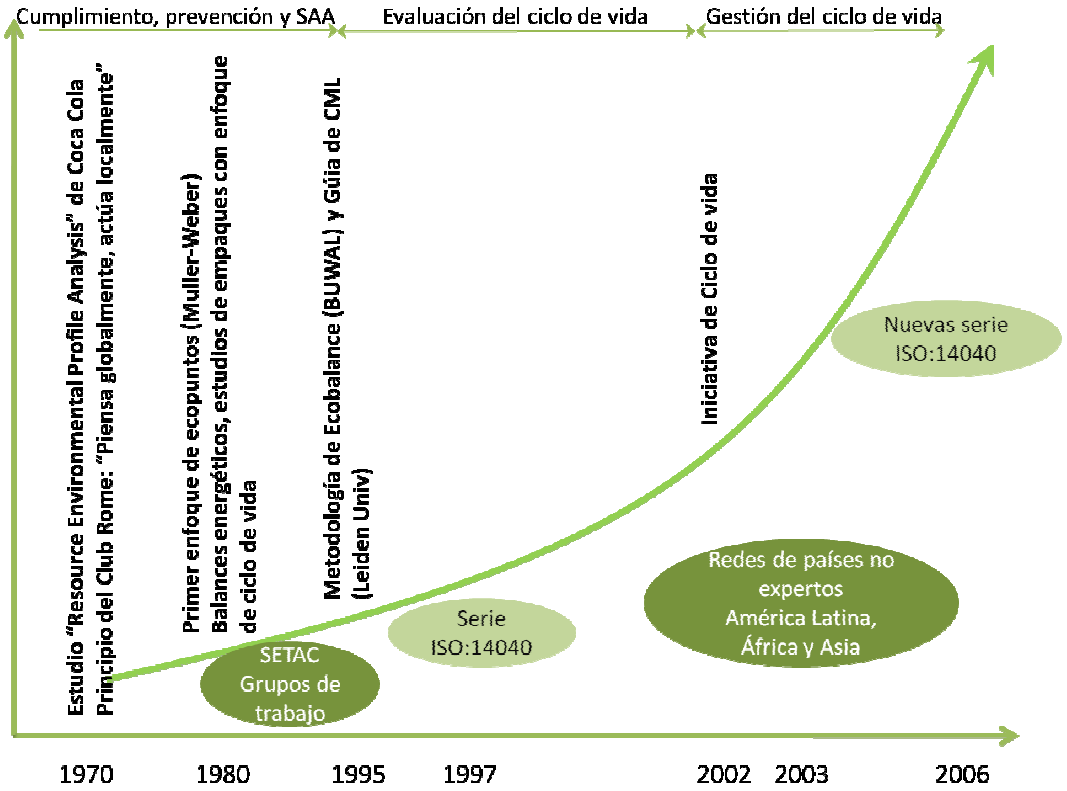


Figura 3.1 Evolución del Análisis de Ciclo de Vida

Fuente: CMM con información del Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS), 2008

El ACV es la única metodología de valoración de externalidades ambientales que cuenta con lineamientos expedidos por la Organización Internacional de Estandarización (ISO)[13]. Como se mencionó en el párrafo anterior, la primera serie ISO designada para la aplicación del ACV se desarrolló en 1997, pero en 2006 se reorganizaron los contenidos de la serie anterior derivando en la nueva norma ISO 14044. La nueva serie quedó de la siguiente manera:

- ISO-14040:2006 donde están descritos los principios y aplicaciones del ACV.
- ISO-14044:2006 donde están definidos los requisitos y guías (se incluyen los elementos técnicos de las normas ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043).

En el año 2003, se creó en México un subcomité nacional para redactar las normas NMX-SSA-14040-IMNC-2008 y la NMX-SSA-14044-IMNC-2008, análogas a la serie ISO 14040, las cuales fueron aprobadas en el año 2008. Cabe aclarar que la aplicación de estas normas es de carácter voluntario.

De acuerdo a la norma ISO 14040, se define al ciclo de vida como las "etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición

final[15]". El ACV analiza todas las etapas desde la extracción, transformación y uso de la materia prima, producción, transporte y generación u obtención del producto hasta su eliminación y/o reciclado, es decir, "de la cuna a la tumba".

El impacto ambiental de un sistema es la sumatoria de todos los impactos que ocurren durante todo el ciclo de vida. Estos impactos están relacionados con varios problemas ambientales que pueden ocurrir en diferentes fases del ciclo de vida.

El ACV es una técnica para cuantificar los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o servicio, mediante la recopilación de un inventario de entradas y salidas relevantes de un sistema producto; la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con estas entradas y salidas; y la interpretación de los resultados del inventario y de las etapas de evaluación del impacto en relación con los objetivos del estudio. La interrelación de estas actividades se ilustra en la Figura 3.2.

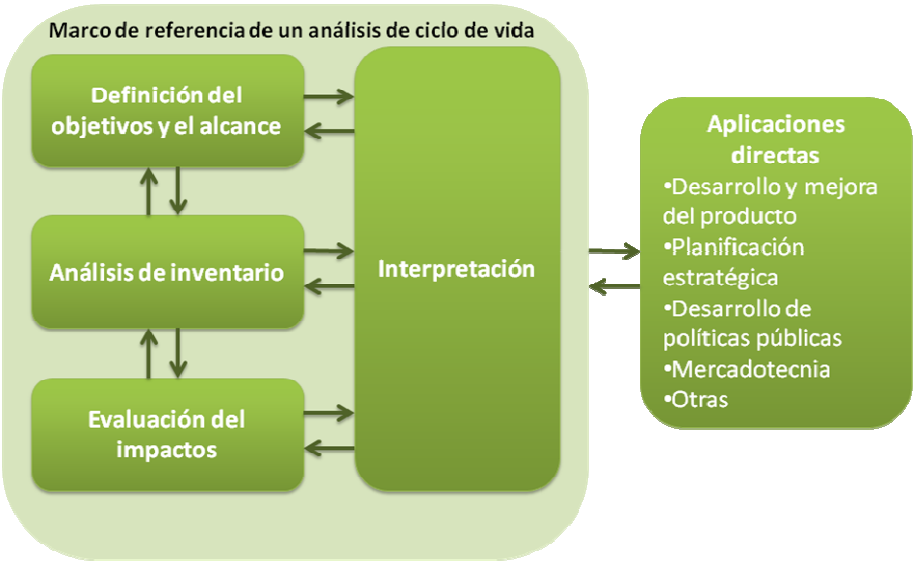


Figura 3.2 Actividades involucradas en el Análisis de Ciclo de Vida
Fuente: ISO:14040:2006

Una metodología de ACV consta entonces de al menos cuatro etapas:

ETAPA 1. Definición y alcance del objetivo.

ETAPA 2. Análisis del inventario (inventario de ciclo de vida, ICV): base de datos que cuantifica la energía y materia prima, así como sus emisiones, residuos y desechos. Para esto se desarrollan un diagrama de flujo, la recolección de los datos y la definición de los límites del sistema.

[15] Organización Internacional de Normalización (ISO), ISO: 14040: 2006 Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y Marco.

ETAPA 3. Evaluación de impacto (EICV): proceso para evaluar y ponderar efectos de las cargas ambientales del inventario, clasificando los efectos al medio ambiente en diferentes categorías de impacto ambiental y modelando indicadores para cada categoría.

ETAPA 4. Interpretación: evaluación sistemática de las necesidades y oportunidades para reducir el impacto ambiental, reporte y análisis de mejoras.

Dentro de esta estructura hay dos partes fundamentales: el inventario de ciclo de vida (ICV) y la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV). En el primero se calculan todos los impactos durante el ciclo de vida y en el segundo (modelo de asignación) se relacionan esos impactos con los problemas ambientales, con el fin de obtener un eco-indicador.

A continuación se describen brevemente las cuatro etapas de la metodología del ACV.

ETAPA 1. Definición del Objetivo y el Alcance

En esta fase se define el propósito y el método para incluir los impactos ambientales del ciclo de vida en el proceso de toma de decisiones. Esta parte es fundamental en el ACV porque de ella dependerán los resultados del análisis. Para utilizar de forma efectiva el tiempo y los recursos en un ACV se recomiendan las siguientes decisiones[16]:

- Definir el o los objetivos del proyecto.
- Determinar qué tipo de información necesita el público al cual va dirigido el estudio.
- Determinar cómo se deben organizar los datos y si los resultados se utilizarán en comparaciones públicas.
- Determinar qué se incluirá y qué no en el ACV (definir los límites del sistema).
- Determinar la exactitud requerida para los datos.
- Determinar reglas básicas para la realización del análisis.

Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema, siendo lo ideal que el sistema del producto o servicio se modele de tal manera que las entradas y salidas en sus límites sean flujos elementales[15].

Se debe considerar al establecer los límites del sistema la adquisición de la materia prima, entradas y salidas al proceso de manufactura principal, distribución y/o transporte, producción y uso de combustibles, electricidad y energía, uso y mantenimiento de productos, recuperación de productos usados, manufactura de materiales básicos, manufactura, mantenimiento y desmantelamiento de equipos y operaciones adicionales, como alumbrado y calefacción.

[16] World Energy Council, 2004. Comparison of energy systems using life cycle assessment.

Después de determinar los límites del sistema es necesario especificar las funciones o características de desempeño que debe tener el producto o servicio. Esta *unidad funcional* define numéricamente las funciones identificadas y deber ser consistente con el objetivo y el alcance del estudio, siendo clara y medible. Posteriormente es necesario conocer el flujo de referencia para calcular las entradas y salidas del sistema el cual describe el rendimiento del producto.

ETAPA 2. Análisis de inventario

El análisis del inventario (ICV) es el núcleo del ACV. El nivel de exactitud y detalle de los datos recogidos en esta etapa se refleja en el resto del proceso del ACV. El ICV consiste en la recolección y procesamiento de datos relacionados con la producción y uso del producto o servicio especifico[15]. En esta etapa se cuantifican los requisitos de energía, materia prima y otras entradas físicas, productos, co-productos y desechos, emisiones a la atmósfera, descargas al agua y al suelo y otras emisiones provenientes de la totalidad del ciclo de vida del producto, proceso o servicio en estudio.

Los pasos de un ICV se pueden resumir de la manera siguiente:

- Desarrollo de un diagrama de flujo (árbol de proceso) del proceso que se está evaluando.
- Desarrollo de un plan de recolección de datos.
- Recolección de datos, tomando en cuenta indicadores de calidad.
- Evaluación e informe de los resultados.

En el diagrama de flujo se describe y simula el sistema a analizar y sirve de guía para la recolección de los datos. Este diagrama o árbol de proceso se desarrolla a detalle hasta los límites definidos en la primera etapa o se pueden redefinir los límites del sistema. El flujo de proceso se divide en una serie de procesos unitarios interconectados. Es necesario analizar todas las conexiones dentro de la cadena de proceso y todos los insumos y productos para cada uno de ellos.

Al documentar los resultados del ICV, es importante anotar y explicar claramente las suposiciones realizadas, describir a detalle la metodología utilizada para definir los sistemas analizados y los límites impuestos.

ETAPA 3. Evaluación de Impacto

En esta fase es necesario evaluar los impactos ambientales de mayor importancia dependiendo de las características geográficas del lugar, los cuales tendrán un mayor o menor efecto en la salud humana y los ecosistemas.

Para poder llevar a cabo la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) es necesario los siguientes elementos:

- Selección y definición de categorías de impacto (obligatorio).

Folio No. 0031

- Clasificación: asignación de los resultados del inventario (ICV) a distintas categorías de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado (obligatorio).
- Caracterización: modelación de indicadores para cada categoría, es decir, convertir los resultados del inventario a unidades comunes que permitan su agregación (obligatorio).
- Normalización: consiste en dividir cada resultado de la caracterización entre un valor de referencia, cargas promedios anuales o población total de una región (opcional).
- Agrupación: Asignar las categorías de impacto en uno o más conjuntos de acuerdo a los definido en objetivo y el alcance del ACV (opcional).
- Ponderación: conversión de los resultados de indicadores de diferentes categorías de impacto, por medio de factores numéricos (opcional).
- Análisis de la calidad de datos (opcional).

Las categorías de impacto son clases que representan los problemas o preocupaciones ambientales a los cuales se debe asignar los resultados del inventario de ciclo de vida[17].

Se deben considerar ciertos aspectos para identificar y decidir las categorías de impacto a utilizar en el ACV[18]:

- **Cobertura**: todos los problemas ambientales relevantes deben de ser incluidos en la lista.
- **Práctico**: la lista no debe de contener muchas categorías.
- **Independencia**: los conteos dobles deben ser evitados escogiendo categorías de impactos mutuamente independientes.
- **Relación con la caracterización**: las categorías de impactos a escoger deben estar relacionadas con los métodos de caracterización disponibles.

Las categorías de impacto consideradas son[18]:

- Potencial de calentamiento global
- Potencial de acidificación
- Materiales sólidos
- Uso de suelo
- Biodiversidad
- Potencial de creación de ozono fotoquímico

[17] Organización Internacional de Normalización (ISO), ISO:14044:2006 Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida- Requisitos y Directrices.
[18] Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources. European Environment Agency. 1997

- Eutroficación
- Ecotoxicidad y toxicidad humana
- Agotamiento de recursos naturales
- Potencial de agotamiento de ozono estratosférico

Después de la clasificación el siguiente paso es el cálculo de los resultados del indicador (caracterización) lo que requiere utilizar factores de caracterización para obtener unidades comunes que permitan su agregación dentro de una misma categoría de impacto, es decir, expresar cada grupo en términos de un solo contaminante. El modelo de caracterización, refleja el mecanismo ambiental que describe la relación entre los resultados del inventario de ciclo de vida, los indicadores de las categorías y a veces los daños, para obtener así los factores de caracterización adecuados. El modelo debe documentarse e incluir los juicios de valor y las suposiciones utilizadas.

Además de los elementos descritos anteriormente existen elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y el alcance definidos.

La normalización muestra el grado de contribución de cada categoría de impacto. Transforma el resultado de un indicador dividiéndolo por un valor de referencia seleccionado (por ejemplo entras y salidas para una determinada área en una base *per cápita* o medición similar). Otro elemento es la agrupación en donde se asignan las categorías de impacto en uno o más conjuntos de acuerdo a lo definido en el objetivo y el alcance.

En la ponderación se convierten los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto, mediante factores numéricos (factores de ponderación) basados en juicio de valor. En decir, consiste en multiplicar los factores de ponderación por el resultado de la normalización para cada categoría de impacto y agregarlos para obtener una puntuación total.[19]

Existen diferentes modelos para la asignación de datos para diferentes categorías, entre los más utilizados están el Eco-indicador 99, explicado en el Capítulo 2 de este documento, y el CML de Universidad de Leiden, Holanda, junto con modelos desarrollados en Alemania, Suiza y Dinamarca. Debido a su complejidad, los diferentes modelos de asignación se trabajan con software especializado[14] (ver apartado 3.1). Se recomienda utilizar diferentes factores de ponderación y realizar un análisis de sensibilidad.

ETAPA 4. Interpretación de resultados

Esta es la cuarta fase del ACV en donde se compila la información de los pasos anteriores para llegar a un juicio final. Este resultado solamente es un apoyo a la decisión por lo cual podría ser necesario en la toma de decisiones una herramienta adicional, como puede ser el costeo de los daños a la salud pública. Además todos los aspectos no

[19] El análisis del ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial. Alfonso Aranda Usón, Ignacion Zabalza Bribian, Amaya Martínez Gracia, Alicia Valero Delgado, Sabina Scarpellini. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIREC).

Folio No. 0033

ambientales (sociales, económicos, entre otros) deben ser tomados en consideración en la parte del proceso de toma de decisiones[14].

De acuerdo a la ISO 14044 2006 se han definido dos objetivos de la interpretación de ciclo de vida:

- Analizar los resultados, llegar a conclusiones, explicar limitaciones y formular recomendaciones basadas en los hallazgos de la interpretación del ciclo de vida en forma transparente.
- Proveer una presentación de fácil comprensión, completa y coherente de los resultados del ACV, conforme al objetivo y alcance del estudio planteado[16].

En la Figura 3.3 se resume la fase de interpretación con otras fases del ACV.

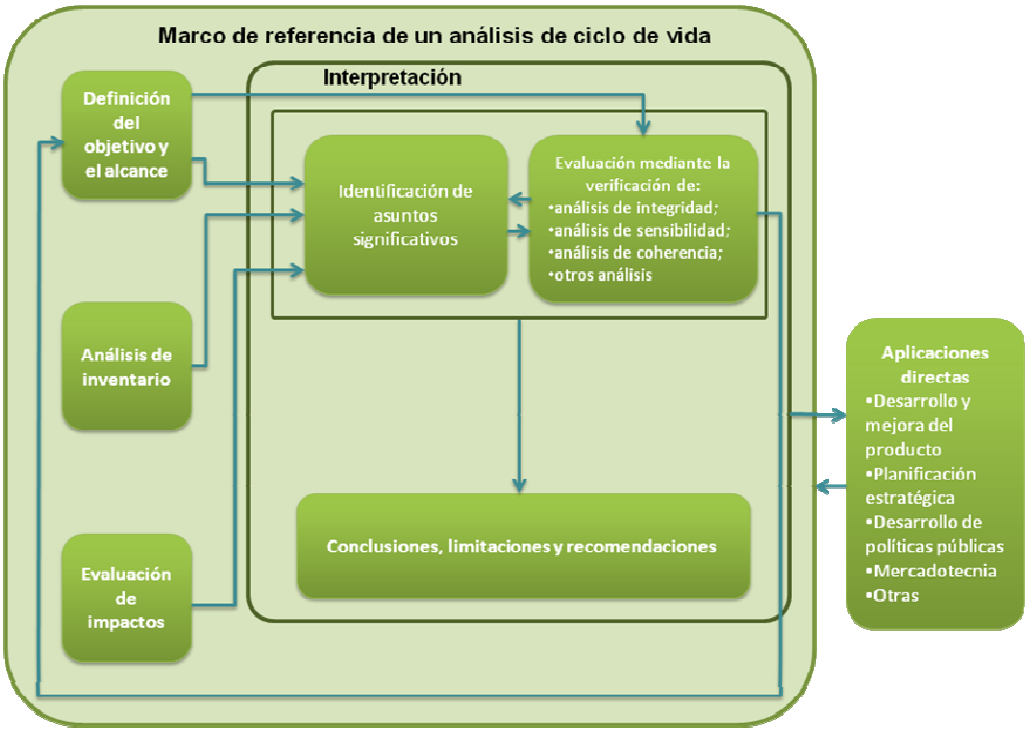


Figura 3.3 Procedimiento de la Metodología de ACV

Fuente: ISO:14044:2006

3.1. Herramientas para el análisis de ciclo de vida.

Debido a la extensa cantidad de datos que son necesarios recopilar y analizar en la metodología de análisis de ciclo de vida, diversas instituciones y empresas han desarrollado programas para llevar a cabo de forma eficiente este análisis. Algunos programas han sido desarrollados únicamente para la fase del inventario de ciclo de vida y otros incluyen también la evaluación del impacto e interpretación.

Actualmente existen casi 40 programas para el ACV, por lo que es necesario para su uso, comparar el número de base de datos, procedencia, calidad, facilidad de manejo y la posibilidad de utilizar distintos métodos de evaluación de impactos, además es importante que el programa permita editar las bases de datos existentes e importar con facilidad bases de datos nuevas.

En la Tabla 3.1 se presentan algunos de los programas que se utilizan actualmente para el análisis de ciclo de vida:

Tabla 3.1. Programas de Cómputo para realizar Análisis de Ciclo de Vida

Nombre	Compañía o Institución	País	Comentarios
BESS 3.0	National Institute for Standards and Technology (NIST)	Estados Unidos	Programa utilizado para equilibrar los resultados ambientales y económicos en los productos de construcción, analizando todas sus etapas.
Boustead	Boustead Consulting	Europa	Es una herramienta para el cálculo del inventario del ciclo de vida. Contiene una extensa base de datos.
Eco-it	Pré Consultants	Países Bajos	Calcula la carga ambiental de un producto y pone de manifiesto que partes contribuyen más. Utiliza el Eco-indicador99. Fácil de usar. Dispone de base de datos propia y editable.
Ecopro	Sinum AG-EcoPermoance Systems	Suiza	Base de datos BUWAL. Manejo sencillo.
Ecoscan 3.0	TNO Industrial Technology	Países Bajos	Analiza el impacto ambiental y el costo de los productos. Para implementación del ecodiseño de productos.
EDGE	Pacific Northwest National Laboratory	Estados Unidos	Proporciona guías para el diseño sostenible en proyectos.
EPS 2000 Design System	Assess Ecostratgy	Suecia	Programa para la evaluación del impacto de ciclo de vida se usa para desarrollar productos sustentables.
Euklid	Fraunhofer-Institut	Alemania	Orientado a estudios de ACV de productos industriales.
E3 Database	Ludwing-Bolkow-Systemtechnik GmbH	Alemania	Asocia costos económicos, centrado en temas de energía, con múltiples opciones de modelado. Permite agregar base de datos.

Folio No. 0035

Nombre	Compañía o Institución	País	Comentarios
Gabi 4	PE Europe GmbH and IKP University of Sttugart	Alemania	Permite asociar costos económicos y aspectos sociales a los flujos. Puede analizar escenarios, variación de parámetros, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre (Monte Carlo). Múltiples métodos de evaluación de impacto.
GEMIS 4.5	Öko-Institut	Alemania	Programa para el análisis de ciclo de vida y base de datos de energía, material y sistemas de transporte. La base de datos es gratuita.
GREET	Department of Energy	Estados Unidos	Permite evaluar diversos motores y combinación de combustibles con base en el ciclo del combustible.
IDEMAT	Delft University of Technology	Holanda	Dispone de una base de datos de materiales de procesos y componentes. Manejo sencillo para la selección de materiales en el proceso de diseño.
KCL Eco 4.0	Finnish Pulp and Paper Research Institute	Finlandia	Incluye la asignación, evaluación del impacto (caracterización, normalización y ponderación) y características gráficas. Utiliza los Eco-indicadores 99 y DAIA 98. Destaca por datos de la industria papelera.
LCAit 4	CIT Ekologik	Suecia	Utilizado para el análisis ambiental de productos y procesos, incluye base de datos de evaluación de impacto, factores de caracterización y de ponderación. Enfocado al sector de envases y productos de papel.
LCAPIX	KM Limited	Estados Unidos	Combina el ACV y costos para ayudar a las empresas a asegurar el cumplimiento ambiental sin dejar de asegurar la rentabilidad.
Miet 3.0	Centre of Environmental Science (CML)	Países Bajos	Es una hoja de cálculo de Microsoft Excel para estimar el inventario de ciclo de vida y se basa en datos ambientales de Estados Unidos. Gratuito.
Pems	Pira International	Reino Unido	Interfaz gráfico. Manejo accessible.
Simapro	Pré Consultants	Países Bajos	Utiliza múltiples métodos de evaluación de impactos. Contiene completas y variadas bases de datos documentadas con sus fuentes que pueden se editadas y ampliadas. Los impactos los calcula de acuerdo a la ISO 14040. Puede comparar escenarios, variación de parámetros, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre (Monte Carlo).

Nombre	Compañía o Institución	País	Comentarios
Team™ 4.0	Pricewaterhouse Coopers Ecobilan Group.	Francia	Permite introducir información relativa a costos y editar la base de datos. Calcula inventarios e impactos según la norma ISO 14040. Permite hacer análisis de escenarios y análisis de sensibilidad.
Umberto	Institute for Environmental Informatics	Alemania	Para realizar ecobalances empresariales, extensa y flexible base de datos. Permite el análisis multi-producto y la introducción de costos económicos.
Wisard	Pricewaterhouse Coopers Ecobilan Group	Francia	Para el análisis de impacto económico y medioambiental de residuos sólidos municipales.
Herramientas basadas en plataformas web			
LCA.Light Tool	ABB Corporate Research		Calcula impactos ambientales de materiales, energía y transporte
LCA@CPM	Chalmers University of Technology		En desarrollo
LCA-E	IVF y CPM Chalmers		Evaluaciones simplificadas del ciclo de vida de circuitos electrónicos.
WWWLCAW	CPM		Las bases de datos pueden cargarse y descargarse desde el sitio y la herramienta calcula los índices de evaluación de impacto así como el ACV completo
LCCLight	ABB Corporate Research		Permite introducir los datos de costos para las diferentes fases del ciclo de vida y evaluar el impacto sobre el costo total
SPINE@CPM	CPM		Esta herramienta es de fácil manejo para la gestión de información ambiental y los datos.

Fuente: CMM con información de: *U.S. Eviromental Protection Agency* y *PRé Consultants*.

4. ALTERNATIVAS DE VALORACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Considerando que los individuos toman sus decisiones de manera racional, los economistas han ideado formas de valorar económicamente los costos del daño ambiental, a pesar de la inexistencia de un mercado donde puedan ser intercambiados los bienes ambientales, a veces intangibles. Si existe una posibilidad de mejorar el consumo de "calidad ambiental" de un individuo, entonces se dice que tiene una disposición a pagar (DAP) con el fin de obtener una mayor cantidad de ese bien o servicio.

La DAP refleja la valoración económica que hace un individuo en términos monetarios, por la obtención de una unidad de mejora ambiental. Esta unidad podría ser por ejemplo la disposición a pagar que tiene una persona por respirar 30% mejor calidad del aire. Claramente la DAP varía básicamente por las preferencias y el ingreso de cada individuo. Por otra parte, si una persona ve disminuida su calidad ambiental (utilidad) también podría estar dispuesta a aceptar una compensación del daño. A este concepto se le llama disposición a aceptar (DAA).

Estas son medidas de valoración de la política ambiental que sirven para guiar y desarrollar los instrumentos que permitan internalizar las externalidades, y se conoce también como valoración contingente, pues se basa en mecanismos como encuestas para determinar la DAP o DAA de las personas para contar con un recurso natural o ambiental.

Uno de los principales problemas de este tipo de valoración es que muchos de los resultados se enfocan en los usos del recurso. El problema principal es que cuando se consideran algunos bienes, como la estabilidad climática del planeta, se puede conocer el uso de la atmósfera (transporte, medio para descargar emisiones, aire limpio, etc.), pero también existen valores de no uso[20] que todavía no conocemos, o que bien, también pueden afectar a todo el planeta, por lo que no importa si un individuo está dispuesto o no a reducir sus emisiones, sino lo que importa es preservar la atmósfera como un bien común que nos beneficia a todos. En general, esta idea ha sido explorada[21] al preguntar a distintas personas su DAP por la limpieza de un lago en específico y su DAP por limpiar los lagos en general. La conclusión fue que las personas pueden tener un concepto de calidad ambiental más amplio y que no necesariamente se refiere sólo a bienes de uso (por ejemplo el lago cercano), contra bienes de no-uso (por ejemplo un lago al otro lado del mundo). Ampliando esta conclusión es claro que los individuos tienen una mayor o menor DAP por la mitigación y adaptación al cambio climático, a pesar que no les afecte en un entorno cercano, físicamente

Claramente los conceptos de DAP y DAA consideran que los individuos están informados sobre la problemática que presentan sus decisiones. Es decir, una persona informada sobre el daño a la salud que causan las emisiones tóxicas de una instalación industrial tendrá mayor DAP/DAA que una persona que desconoce esta información. Considerando el calentamiento global como un elemento que no está plenamente difundido como riesgo

[20] Krutilla, J. (1967). Conservation reconsidered. American Economic Review. 57, 787-96
[21] Kahneman, D. and J. Knetsch (1992) Valuing Public Goods: The Purchase of Moral Satisfaction, Journal of Environmental Economics and Management, 22, 57-70

Folio No. 0038

global, entonces encontramos que en nuestro país la DAP/DAA puede ser mucho menor por la limitada información de los individuos, y que al no tener esta información sus decisiones son racionalmente incompletas.

4.1. Caracterización de los costos de daño ambiental

El enfoque vía de impacto, como el que se usa en la metodología *ExterE-2005*, requiere de la estimación de los impactos físicos y posteriormente una valoración basada en las preferencias de los individuos afectados. Este enfoque ha sido aplicado con efectividad para valorar los impactos en salud, mientras que en otras áreas no ha podido ser aplicado por falta de información, como es el caso de la acidificación o la eutroficación de los ecosistemas, o en un contexto más amplio, porque la estimación de todos los impactos físicos es limitada, como en el calentamiento global.

Si bien el modelo de ciclo de vida identifica a partir de la determinación de fronteras de una instalación, las emisiones asociadas al proceso de generación de electricidad, hace falta el paso de la valoración económica del daño ambiental en unidades monetarias. De acuerdo a las metodologías de estimación directa del valor del daño ambiental se reconocen cuatro áreas de impacto de las emisiones, tanto de gases de efecto invernadero como de contaminantes criterio, que se desagregan en los cuatro elementos de daño ambiental que se muestran en la Figura 4.1, de forma que pueda estimarse su valor.

Figura 4.1 Identificación de las categorías para la valoración de daños ambientales

Fuente: ExternE

Los principios fundamentales de la estimación directa de los daños ambientales son los siguientes:

a) Utilización de métodos cuantitativos en lugar de cualitativos. Este principio permite la transparencia en todos los procesos asociados a la generación de electricidad.

b) Transformación de impactos en unidades monetarias. Este principio conlleva la posibilidad de hacer análisis costo–beneficio comparando distintas tecnologías de generación. Asimismo, puede resultar muy útil al definir tasas impositivas.

c) La valoración de los impactos está basada en las preferencias medidas de la población afectada, asumiendo que ésta se encuentra completamente informada de los impactos mismos.

d) El cálculo de los daños es específico de cada sitio geográfico, tiempo y tecnología utilizada para la generación de electricidad, por lo que en general se utiliza el enfoque vía de impacto.

La Tabla 4.1 muestra una visión general de los parámetros que considera la metodología de Vías de Impacto.

Tabla 4.1 Visión General de la Metodología Vías de Impacto

	Contaminación del aire			Calentamiento global
	Salud pública	Agricultura e infraestructura	Ecosistemas	
Cuantificación de impactos	Si	Si	Si, cargas críticas	Si, parcialmente
Valoración económica	Disposición a pagar (DPA)	Precios de mercado		Si, DPA y precios de mercado

Fuente: ExternE

4.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL VALOR DE LOS DAÑOS AMBIENTALES LIGADOS A LA SALUD

Como lo define la metodología que usa el Eco-indicador 99, muchos de estos daños son cuantificables a partir de parámetros ajustados para facilitar la comparación entre tecnologías de generación de electricidad y facilitar el costeo de sus impactos, incluso hacer ponderaciones de los impactos. Por ejemplo, es más importante el impacto de los efectos carcinogénicos que los impactos sobre la infraestructura. El principal parámetro del costo del daño ambiental son los Años de Vida Ajustados por Discapacidad (AVAD o DALY´s por sus siglas en inglés[22]), cuando se habla de salud. Esta unidad de medición en tiempo es el resultado de la combinación de años de vida perdidos por mortalidad

[22] DALY´s: Disability-Adjusted Life Year

prematura, así como años de vida perdidos por el tiempo vivido en estados de salud incompleta, como enfermedades, accidentes y otros factores de riesgo[23].

Como se expone en la sección introductoria, el daño a la salud es una de las consecuencias de las emisiones asociadas a la generación de electricidad identificadas a partir del ciclo de vida. Para ello, cada instalación de generación se sitúa geográficamente y se modela la dispersión de los gases en la atmósfera. Como siguiente paso se establece la exposición que tienen distintas poblaciones, dependiendo de la ubicación geográfica, la distancia de la fuente de emisión, las características meteorológicas, así como la densidad poblacional, para obtener el impacto de las emisiones a través de la función de dosis – respuesta de las personas por centro urbano. Por último se realiza una valoración monetaria de los costos asociados al daño en salud[24]. Es decir, se valora individualmente el daño a nivel local y a nivel global de las emisiones asociados a la generación de electricidad a partir de los AVADs.(ver Figura 4.2).

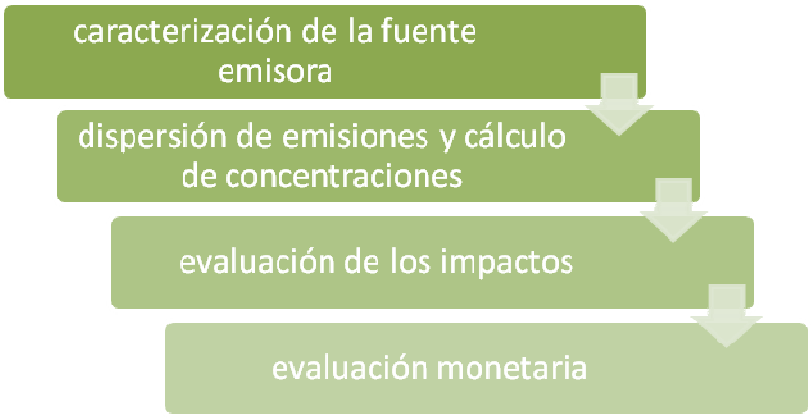


Figura 4.2 Diagrama de la valoración económica de los daños en salud

Fuente: ExternE

La caracterización de la fuente emisora se refiere en el sentido más simple a la emisión de la chimenea, pero en el contexto del análisis del ciclo de vida, esto significa todas las emisiones asociadas a la generación de electricidad, como puede ser el transporte, extracción, transformación y distribución. La dispersión de emisiones es la forma de establecer que la caracterización sea específica al sitio donde ocurren las emisiones. Este componente puede ser muy complejo de obtener, sobre todo si se considera que se tiene que hacer un estudio de condiciones geográficas y meteorológicas para cada instalación de generación de electricidad.

La evaluación de los impactos se refiere a la evaluación dosis–respuesta sobre las personas, y los efectos en la mortalidad y la morbilidad. Como se mencionó

[23] World Health Organization. WHO GBD Project. 2009, visitado en: http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/en/index.html

[24] ExternE. Externalities of Energy. Methodology 2005 Update. Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. European Commission.

anteriormente, la unidad de medida que se utiliza para homogeneizar y hacer comparables los resultados son los AVADs. Por último, es posible hacer una valoración económica de los costos incurridos para los AVADs, reflejados en unidades como ingresos a hospitales, ausentismo, disminución de la productividad laboral, entre otras medidas.

Si bien hemos visto que la metodología directa de la valoración de los daños a la salud es posible para los contaminantes criterio, significa una mayor complejidad para los gases de efecto invernadero, principalmente por su interacción con otros procesos tanto químicos como físicos en la atmósfera, como se muestra en la Figura 4.3.

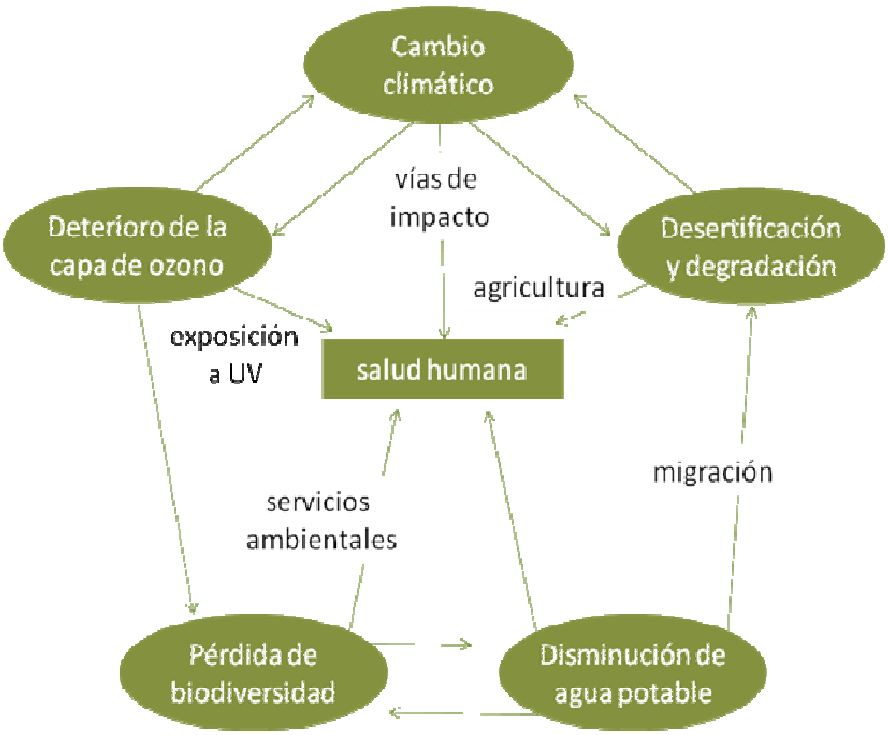


Figura 4.3 Interacciones del cambio climático y la salud humana, agricultura y ecosistemas

Fuente: World Health Organization, 2009[25]

[25] http://www.who.int/globalchange/en/

4.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL VALOR DE LOS DAÑOS AMBIENTALES LIGADOS A LA AGRICULTURA Y LA INFRAESTRUCTURA

Para cuantificar el valor de los daños en agricultura[26] se estima la extensión de terreno perdido o afectado que disminuyen su valor debido a la emisión tanto de gases de efecto invernadero como de contaminantes criterio.[27] Claramente este enfoque requiere de información detallada de los volúmenes de producción agrícola, así como de las extensiones sembradas y los precios a los que se vende dicha producción. El daño es calculado como una disminución de la ganancia sobre la extensión cultivada, ya sea por menor productividad o menor calidad que redunde en un precio menor en el mercado, en el caso de la agricultura, o bien, la disminución del valor de la infraestructura, sobre todo la histórica.

Si se lleva el caso de la agricultura a la par al de salud, vemos que es sumamente complejo encontrar la concentración y la dosis que reciben tanto las extensiones de tierra dedicadas a la agricultura como la infraestructura en los centros urbanos. La asignación de un valor monetario a la agricultura podría ser teóricamente realizable, pero la disminución de las funciones de utilidad de la infraestructura, sobre todo cuando se considera aquella de carácter histórico, resulta en una valoración económica indirecta, a través de métodos hedónicos.

4.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL VALOR DE LOS DAÑOS AMBIENTALES LIGADOS A LOS ECOSISTEMAS

La caracterización del valor de los daños ambientales ligados a los ecosistemas es quizá la que más complejidades conlleva, particularmente por todas las interrelaciones que existen con los sistemas humanos, pero en general se puede decir que principalmente se deben a la reducción de la biodiversidad asociada a la eutroficación, acidificación y cambios en el uso del suelo.

Una vez más, la valoración económica de cada uno de estos componentes requiere de técnicas de estimación contingente que a través de encuestas determinen los valores en que la sociedad puede definir su disposición a pagar por mantener una especie o la integridad de un ecosistema, por poner un ejemplo.

[26] Murphy, J. et al. *The cost of crop damage caused by ozone air pollution from motor vehicles*. Journal of Environmental Management (1999) 55, págs.. 273–289.

[27] Es muy importante señalar que los contaminantes criterio podrían hacer disminuir la productividad y valor de una unidad de extensión de tierra cultivada, pero por otra parte, el aumento de las concentraciones del CO2 puede aumentar la productividad de las plantas. Asimismo, siendo que la agricultura también es una fuente de gases de efecto invernadero, se tendría que contabilizar los efectos de retroalimentación de la exposición sobre la tasa de emisión de la extensión de tierra evaluada en tanto a su daño asociado a la generación de electricidad, y su contribución a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

5. PROPUESTA PARA LA VALORACIÓN DE EXTERNALIDADES DEL SECTOR ELÉCTRICO EN MÉXICO

El Centro Mario Molina propone que el Sector Eléctrico en México valore sus externalidades ambientales en dos pasos consecutivos y complementarios, primero mediante la aplicación de una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar los daños producidos por sus emisiones contaminantes al aire, agua y suelo, y segundo, a través de una monetización de los daños a la salud pública y los ecosistemas mediante la aplicación de metodologías de vías de impacto.

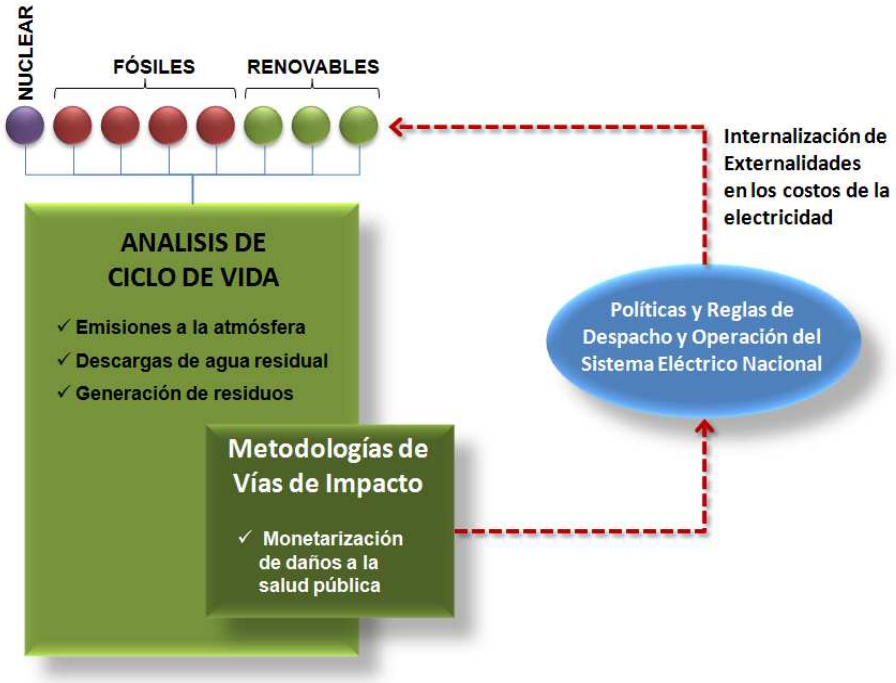


Figura 5.1. Esquema General para la Internalización de Externalidades Ambientales en México

Para cuantificar de una manera integral y homogénea las externalidades ambientales de las unidades de generación de energía eléctrica actuales y futuras el ACV se debe aplicar conforme a los estándares establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) y que quedaron adaptadas a nuestro país en la norma mexicana NMX-SSA-14044-IMNC-2008.

La aplicación de una metodología de ACV en el sector eléctrico permitiría aprovechar las experiencias internacionales que existen para la cuantificación de externalidades ambientales locales, regionales y globales, ya que es una herramienta sólida y normalizada, a la cual se están asociando continuamente los resultados de investigaciones científicas sobre los efectos al medio ambiente y la salud pública por la generación y el uso de la energía eléctrica. Asimismo, los nuevos desarrollos tecnológicos se están evaluando y comparando a nivel mundial con base en esta herramienta.

Folio No. 0044

Al aplicar esta herramienta en México es posible evaluar de una manera integral el portafolio presente y futuro de generación eléctrica, en el contexto de una deseada economía global baja en carbono.

El análisis del ciclo de vida de esta actividad industrial es una labor compleja, ya que implica:

- Cuantificar a detalle los impactos ambientales asociados en todas las etapas del ciclo de vida de la electricidad, empezando por la obtención del combustible, la construcción de la unidad de generación, su operación, transmisión y distribución de la electricidad, el manejo de residuos y hasta el desmantelamiento de los activos;
- Comparar con índices e indicadores conmensurables, los diversos impactos a los ecosistemas, los recursos naturales, la infraestructura y la salud pública, entre sí y entre diversas alternativas de generación; e,
- Identificar impactos específicos en función de las regiones de interés donde se alojan las unidades de generación.

Para lograr lo anterior, es importante resaltar que en nuestro país la disponibilidad y recolección de datos será de vital importancia, ya que será necesario crear los inventarios de ciclo de vida de cada insumo involucrado en el proceso de generación de energía eléctrica.

La Figura 5.2 muestra de manera esquemática las etapas que integran el ciclo de vida de la electricidad, incluyendo las diversas fuentes de energía que se emplean en México.

Como se observa, el ciclo de vida puede extenderse a muy diversas regiones y actividades ajenas a la generación directa de electricidad en México. Por ejemplo, si se importa gas natural licuado del Caribe o carbón de Colombia, éstos tienen muy diversos impactos ambientales en dichas regiones, que pueden o no incluirse en la cuantificación de las externalidades de la electricidad vendida en nuestro país, máxime si se comparan con combustibles que se producen nacionalmente. Igualmente sucede si se considera el transporte de contaminantes atmosféricos a otras regiones, como es el caso del bióxido de carbono que se dispersa a nivel planetario incrementando el problema del cambio climático, o de los óxidos de azufre y nitrógeno que pueden causar acidificación de suelo y agua en la región del Golfo de México que compartimos de manera colindante con Estados Unidos y Cuba.

Por lo anterior, es necesario fijar los límites del sistema a analizar. Un primer límite en la metodología que aquí se propone para la estimación de daños a la salud derivados de la emisión de contaminantes al aire, agua y suelo es el límite geográfico del territorio nacional. Para gases y partículas de efecto invernadero se propone asumir un impacto global cuyo costo estaría definido por el costo de mitigación específico.

Folio No. 0045

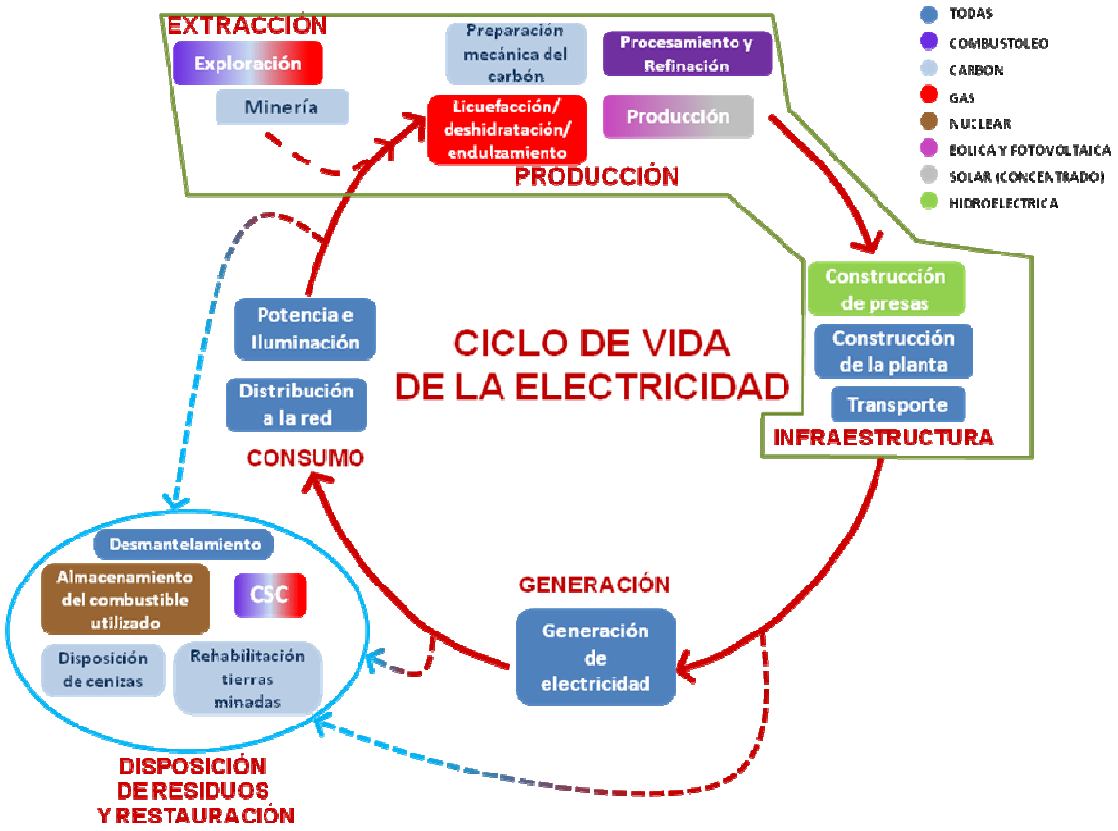


Figura 5.2 Ciclo de Vida de la Generación de Energía Eléctrica en México
Fuente: CMM con información de la ISO 14044

De igual forma, es necesario definir con claridad las fases de aplicación de este enfoque en nuestro país, ya que no sería posible incluir en una primera instancia todas las actividades y procesos que se ven involucrados en la producción y uso de la electricidad en México, ya que no contamos aún con ACV para la extracción de productos petrolíferos por parte de PEMEX, la extracción de carbón mineral por MICARE o la construcción de grandes presas hidroeléctricas por parte de la CNA. Por este motivo, se proponen las siguientes fases y años de aplicación:

2010-2012. Fase 1. Generación

2013-2015. Fase 2. Extracción y Preparación de Combustibles.

2016-2018-Fase 3. Transmisión.

2019-2021. Fase 4. Distribución.

La Figura 5.3 ilustra las fases que se proponen para la aplicación del ACV en el Sector Eléctrico en México, iniciando con la etapa de generación así como con las emisiones a la

atmósfera, las descargas de aguas residuales y residuos sólidos, para en años posteriores incluir gradualmente las actividades de las etapas anteriores y posteriores a la generación eléctrica. Se propone incluir únicamente para fines de reporte las descargas de agua residual y la generación de residuos sólidos, ya que las metodologías para estimar sus daños en los ecosistemas y la salud pública no están tan desarrolladas internacionalmente como lo está lo referente a la emisión de contaminantes atmosféricos.

Esta gradualidad en la aplicación de la metodología de ACV se basa en que más del 80% de las emisiones generadas en el Ciclo de Vida de la Energía Eléctrica provienen de la quema de combustibles fósiles utilizados para su producción, como lo indican estudios realizados por el Consejo Mundial de Energía (WEC) referenciados en el capítulo 2.

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que en nuestro país la única base homogénea de información de las emisiones contaminantes del sector eléctrico está contenida en las Cédulas de Operación Anual (COAs), requiere por SEMARNAT, y los trabajos preparativos que la Comisión Federal de Electricidad y la empresa Luz y Fuerza del Centro tiene que llevar a cabo para cumplir con este requisito de Ley. Las COAs no constituyen en sí mismas un inventario de acuerdo a las normas ISO-14040, pero contienen información valiosa para utilizar y ajustar a las condiciones nacionales, herramientas de cálculo y metodologías como las que se emplean en el *ExternE-2005*.

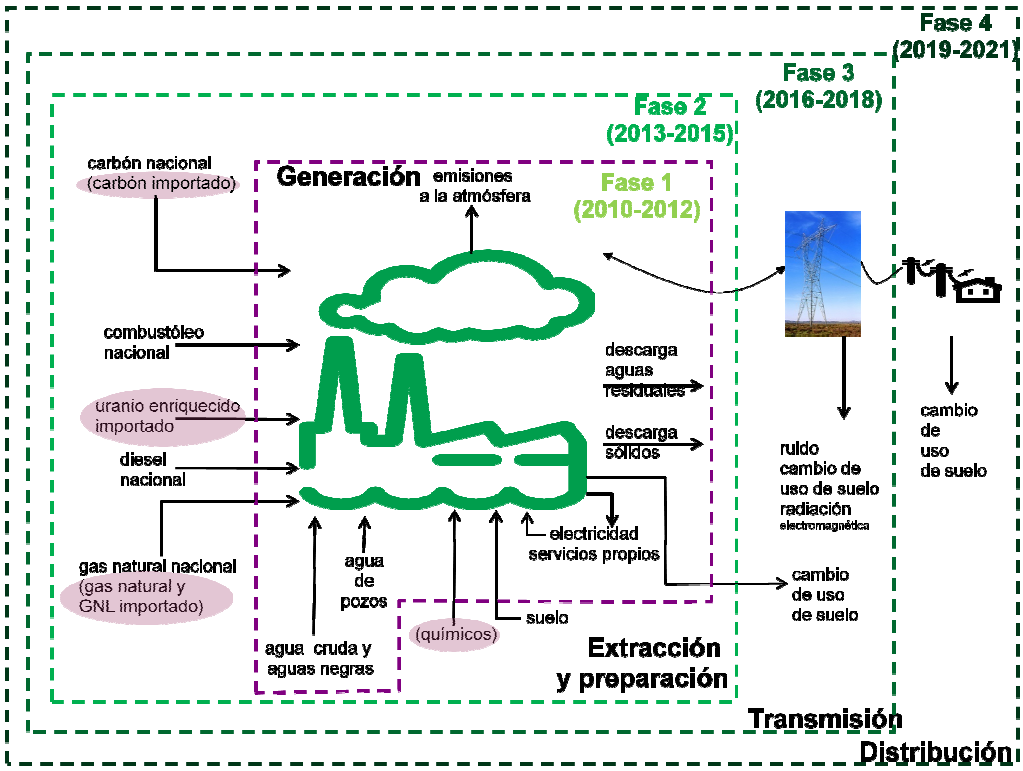


Figura 5.3 Propuesta de límites del sistema para la implementación del análisis del ciclo de vida en el Sector Eléctrico en México

Fuente: CMM 2009

5.1. Contaminantes involucrados en la Generación de Energía Eléctrica

Las unidades de generación de energía eléctrica causan un impacto directo al medio ambiente a través de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, sus descargas de agua residual (tratada o sin tratar) y mediante la generación y disposición de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos. El inventario preciso y estandarizado de este flujo de contaminantes al ambiente es indispensable en la aplicación de metodologías de ACV que nos permitan monetarizar los daños detectados.

5.1.1. EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Todas las unidades de generación de energía eléctrica causan algún impacto ambiental. Las centrales termoeléctricas convencionales que operan con combustóleo, las carboeléctricas y las centrales de ciclo combinado que funcionan con gas natural, son consideradas las fuentes más importantes de emisiones contaminantes a la atmósfera y afectan la calidad del aire a nivel local, regional y global.

La combustión que proviene del consumo de combustibles fósiles resulta en emisiones de bióxido de azufre (SO_2); óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO_2) y partículas sólidas asociadas a la composición del combustible utilizado, tipo y tamaño de la instalación, y su proceso.

La dispersión y la concentración de estas emisiones son el resultado de una interacción compleja entre las características físicas de la chimenea, de la tecnología empleada en la unidad de generación, las condiciones meteorológicas en el sitio y las condiciones topográficas del mismo, así como la naturaleza de los receptores (ej. seres humanos, cultivos y vegetación nativa).

En México, la Norma Oficial Mexicana *NOM-085-ECOL-1994*[28] establece qué contaminantes hay que tomar en cuenta en las fuentes industriales de emisión y establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, todos ellos provenientes de la combustión en equipos de calentamiento directo que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Las emisiones de bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), así como de diversos gases F (en especial el hexafluoruro de azufre SF_6, que se emplea como gas aislante en la industria eléctrica) que ocasionan el efecto invernadero, y que resultan en un impacto global, no están normadas en nuestro país, a pesar de que las emisiones directas de bióxido de carbono (las que se originan durante la vida operacional y que resultan de la combustión de combustibles fósiles) representan entre el 80 y 90 % del volumen de las emisiones totales, como se observa en la Tabla 5.1.

[28] Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas - Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

Folio No. 0048

Tabla 5.1 Emisiones por KWh basada en ACV[29]

Tecnología de Generación	Emisiones de GEI ($mgCO_2e/kWh$)	Emisiones de SO_2 (mg/kWh)	Emisiones de NOx (mg/kWh)	Partículas (mg/kWh)
Hidroeléctrica	2,000 – 48,000	5-60	3-42	5
Nuclear	2,000 – 59,000	3-50	2-100	2
Eólica	7,000 – 124,000	21-87	14-50	5-35
Solar fotovoltaica	1,300 – 731,000	2-490	16-340	12-190
Biomasa	15,000 – 101,000	12-140	701-1,950	217-320
Combustóleo	671,000 - 817,000	n/d	n/d	n/d
Gas Natural (ciclo combinado)	389,000 - 511,000	4-15,000	13-1,500	1-10
Carbón-Nueva tecnología	790,000 – 1'182,000	700-31,321	700-5,273	30-663

Fuente: CMM 2009 con información de IEA 2000.

5.1.2. DESCARGAS AL AGUA

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996[30] establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma incluye una gama muy amplia de posibles contaminantes en parámetros físico-químicos que los agrupan, como es la Demanda Bioquímica de Oxígeno, los Sólidos Suspendidos Totales o el pH; igualmente define límites de concentración para metales pesados específicos, a saber: Arsénico, Cadmio, Cianuros, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc. En especial fija límites de descarga para Nitrógeno y Fósforo Total, ambos contaminantes asociados a procesos de eutroficación, que es una de las categorías de impacto más analizadas en ACV.

Para su operación, las centrales termoeléctricas convencionales que operan con combustóleo, las carboeléctricas y las centrales de ciclo combinado que funcionan con gas natural, requieren agua para los siguientes sistemas y servicios:

- El sistema de enfriamiento principal.
- Repuesto al ciclo de vapor.
- El sistema de enfriamiento de los equipos auxiliares.
- Los servicios generales.
- El sistema contra incendios.
- Manejo de carbón y ceniza

[29] Hydropower-Internalized Cost and Externalized Benefits, "Frans H. Koch, International Energy Agency (IEA)-Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programs, Ottawa, Canada, 2000.
[30] NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales.

Folio No. 0049

A continuación se hace una breve descripción de la naturaleza de estas necesidades en las unidades de generación de energía eléctrica mexicanas:

Sistema de Enfriamiento Principal

Los mayores requerimientos de agua son para el Sistema Principal de Enfriamiento, mismos que dependen de su diseño y fuente de suministro, es decir, los sistemas pueden ser abiertos o cerrados y las fuentes de suministro pueden ser agua de mar, agua de río, agua de laguna, aguas negras y/o aguas de pozo. Estas últimas como repuesto a las torres de enfriamiento para los sistemas cerrados.

Repuesto al ciclo de vapor

Para el Sistema de Repuesto al Ciclo de Vapor, usualmente la fuente de suministro de agua es a partir de pozos y requiere de un tratamiento de filtrado y limpieza para una desmineralización estricta. Los volúmenes requeridos para este servicio, son reducidos si se comparan con los requeridos para el enfriamiento de la Unidad. Es posible también utilizar agua de mar para este sistema de Repuesto, mediante una desalinización y un posterior tratamiento químico a fin de obtener agua desmineralizada.

Sistema de enfriamiento de los equipos auxiliares

El sistema de enfriamiento de los equipos auxiliares operará mediante circuitos cerrados cuyo repuesto es agua tratada o desmineralizada y acondicionada para inhibir la corrosión de los equipos.

Agua de servicios generales, sistema contra Incendio y manejo de carbón y ceniza

Al igual que el agua de enfriamiento de los equipos auxiliares, el agua de servicios y los sistemas contra incendio y manejo de carbón y cenizas se obtienen principalmente de agua de pozos o de la red municipal.

La descarga de aguas residuales puede darse también durante la construcción y desmantelamiento de una central eléctrica. Durante su operación, la descarga proviene de procesos industriales y de la dotación de servicios sanitarios a los trabajadores. Las aguas sanitarias provienen como efluentes de las áreas de servicio y oficinas. Las aguas residuales industriales provienen de los siguientes sistemas, ya sea como parte del proceso o mezcladas por fugas o derrames accidentales con sustancias contaminantes:

- Sistema de enfriamiento principal.
- Sistema de pulidores de condensado.
- Planta de tratamiento de agua de repuesto al ciclo.
- Lavado de precalentadores regenerativos de aire.
- Tanque de solución cáustica para el lavado de precalentadores regenerativos de aire.
- Laboratorio químico y ambiental.
- Sistemas de lubricación.

En nuestro país hay que considerar que las aguas residuales que se generan en las centrales de la CFE y LyFC, se sujetan a las siguientes condiciones:

El agua de mar, ríos o lagunas utilizada en el sistema de enfriamiento principal debe ser vertida al mismo cuerpo de agua del cual se tomó, con un incremento de temperatura entre 8 y 12℃ y siempre inferior al es tablecido como máximo permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Las aguas residuales producto de los pulidores de condensado, de la planta de tratamiento de agua de repuesto al ciclo, del lavado de precalentadores regenerativos de aire, del tanque de solución cáustica para el lavado de precalentadores regenerativos de aire y del laboratorio químico y ambiental, se colectan mediante drenajes químicos para enviarse a una fosa de neutralización, ésta debe contar con capacidad suficiente para tratar todos los efluentes simultáneamente. La fosa normalmente cuenta con equipo de mezclado, bombeo e instrumentación así como lo necesario para dosificación de compuestos químicos utilizados en la neutralización, para su posterior descarga cumpliendo con los parámetros indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Para el manejo de las aguas contaminadas con aceite, las plantas cuentan normalmente con un sistema de drenaje aceitoso que incluye drenajes de piso, canalizaciones y fosas captadoras en las distintas zonas de la Unidad, para su conducción, a través de un drenaje separado del pluvial, a las fosas separadoras y obras complementarias para el manejo y disposición final de los residuos. El agua recuperada en las fosas separadoras agua-aceite, se envía a la fosa de neutralización (donde sigue el proceso de las aguas residuales industriales) y el aceite colectado se almacena debidamente hasta su disposición final.

El agua residual de tipo sanitaria o doméstico es captada por el drenaje sanitario y se envía a la planta de tratamiento de aguas residuales, para después ser usada en el riego de las áreas verdes. Además, se cuenta con un sistema de drenaje pluvial dentro de la Unidad y obras de protección contra escurrimientos exteriores, al cual se conducen las aguas pluviales que se colectan en las áreas de ocupación de la Unidad para su disposición.

Independientemente de lo anterior, en las descargas pueden liberarse químicos contaminantes al ambiente que por diversos procesos de transporte y bioacumulación, pueden afectar a nivel regional o global.

5.1.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Las instalaciones eléctricas generan durante su vida útil residuos, ya sean peligrosos o no peligrosos. Estos residuos pueden ser generados en etapas previas a la operación de las instalaciones eléctricas, durante la operación de las mismas, o bien como resultado del desmantelamiento de éstas.

Folio No. 0051

Las instalaciones del sector eléctrico son sujeto de cumplimiento con la NOM-052-SEMARNAT-2005[31], que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos. De acuerdo a esta norma son residuos peligrosos, en cualquier estado físico, aquellos que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológicas-infecciosas y que por su forma de manejo puedan representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general. La norma especifica una lista muy extensa de sustancias y compuestos tóxicos que es necesario evitar o limitar en la composición de los residuos. Una excepción a esta norma son los desechos radioactivos de las unidades nucleoeléctricas los cuales están sujetos a la NOM-004-NUCL-1994[32], clasificación de los desechos radioactivos, bajo la jurisdicción de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

A los residuos se les hace un análisis de propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológicas-infecciosas (CRETIB) para evaluar dichas características y determinar si los residuos deben ser clasificados como peligrosos, por estar fuera de especificación, por ser caducos o por requerir condiciones particulares de manejo con el objeto de prevenir daños a la salud o a los ecosistemas. Una vez que un residuo es clasificado como peligroso, al igual que los desechos radioactivos, estos deben ser tratados, antes de su disposición temporal y final.

Los residuos no peligrosos, o bien los desechos radioactivos descontaminados que cumplan con los requisitos de la norma, pueden ser dispuestos en bancos de desperdicios industriales convencionales, algunos, como los provenientes de oficinas y servicios sanitarios pueden llegar a ser colectados por los servicios de limpia municipales y dispuestos, teóricamente, en rellenos sanitarios.

Quitarlo. Platicar con Rodolfo. En el caso específico de las tres carboeléctricas que operan en el país, existen superficies superiores a las 100 hectáreas donde se disponen a granel las cenizas generadas por la combustión del carbón (*fly-ash*). Estas áreas de disposición se ubican en las cercanías de las centrales carboeléctricas y están sujetas al intemperismo, por lo que habrá que suponer una dispersión aérea, terrestre y eventualmente acuática de estas cenizas y los compuestos químicos que contengan.

[31] NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos.
[32] NOM-004-NUCL-1994. Clasificación de los Desechos Radioactivos.

5.2. Metodología para la Fase 1 de aplicación del Análisis de Ciclo de Vida del Sector Eléctrico de México

Con base en lo establecido en la norma mexicana NMX-SSA-14044-IMNC-2008 se definen los siguientes requisitos y directrices para el ACV del Sector Eléctrico en México:

5.2.1. OBJETIVO

Evaluar y cuantificar mediante el enfoque de ciclo de vida, el impacto ambiental provocado por unidad operacional de generación de energía eléctrica instalada en México, para internalizar en el costo de la electricidad las externalidades ambientales, en un esquema regulatorio que equipare a las fuentes de energía renovable con las fuentes de energía fósiles.

5.2.2. ALCANCE

Evaluar las unidades operacionales que conforman cada central de generación de energía eléctrica ubicada en México.

Unidad Funcional

La unidad funcional será referenciada a MWh-año.

Límites del Sistema

Los límites del sistema son los correspondientes a la Fase 1 de Generación de electricidad y dispersión o transferencia de contaminantes dentro del territorio nacional, como se ilustra esquemáticamente a continuación:

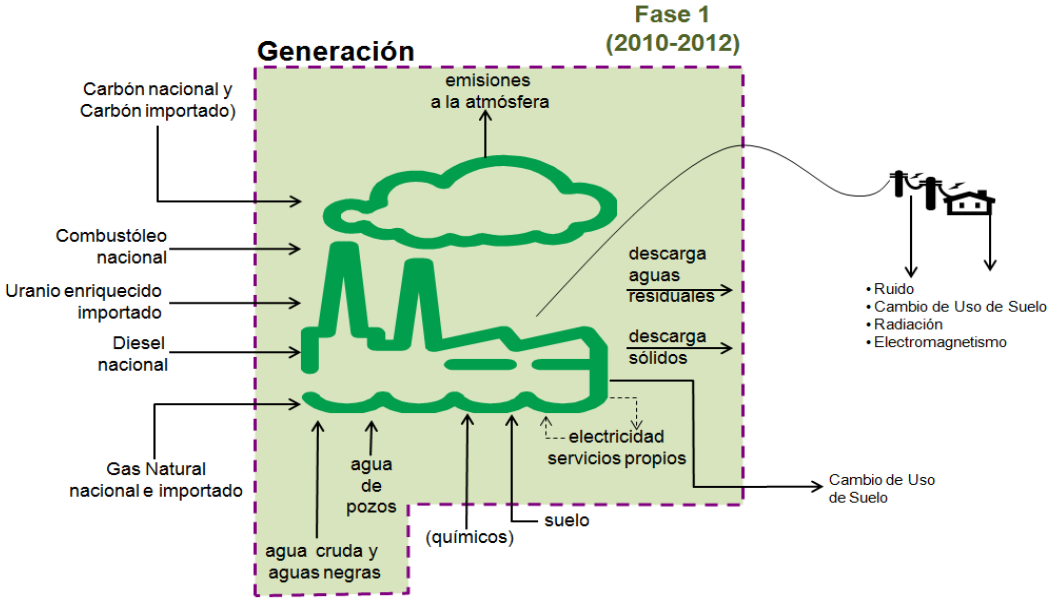


Figura 5.4 Límites de la Fase 1 de aplicación del Análisis del Ciclo de Vida

Fuente: CMM 2009

Dentro de los límites del sistema se incluyen los puntos listados a continuación:

- ✓ Instalaciones que conforman la unidad operacional de generación de energía eléctrica en estudio
- ✓ Combustibles utilizados
- ✓ Empleo de agua de fuentes naturales (ríos, acuífero, mar, presas) o de plantas de tratamiento de aguas residuales
- ✓ Emisiones a la atmósfera, descargas de agua residual y manejo de residuos sólidos
- ✓ Energía eléctrica para servicios propios.

En la Figura 5.5 se muestran con más detalle los elementos y componentes del sistema que entran en juego durante el ACV de la generación de energía eléctrica en una carboeléctrica. Para el auxilio de esta actividad, en el Anexo I se incluye una lista de verificación.

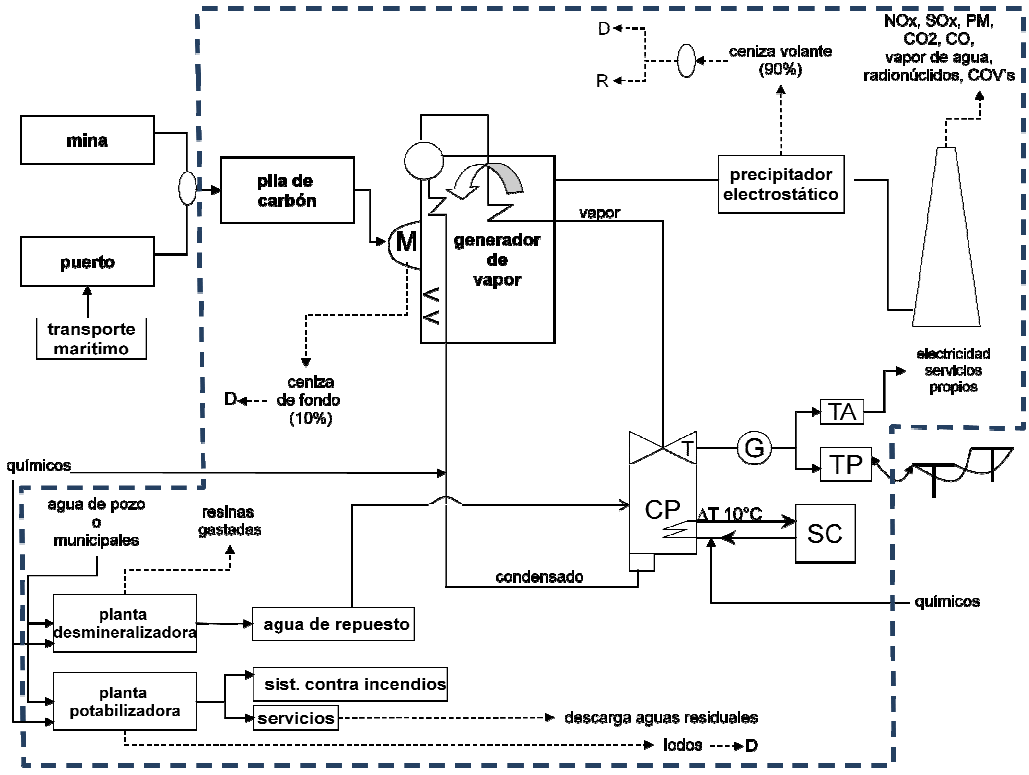


Figura 5.5 Elementos y Componentes a considerar en el Análisis del Ciclo de Vida de la Generación de Energía Eléctrica en una Carboeléctrica

Fuente: CMM 2009

5.2.3. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Para este análisis se cuantifican en detalle los requisitos de energía, materia prima y otras entradas físicas, así como las salidas del sistema.

Recopilación y Calidad de Datos

- ✓ Descripción detallada de cada proceso unitario listando los datos de operación. Como guía se muestra en el Anexo 2 una lista de verificación para el tipo de unidad generadora.
- ✓ Elaboración del diagrama de flujo por unidad operacional, el cual incluya todos los procesos unitarios a cuantificar y sus interrelaciones.
- ✓ Recopilación de datos de acuerdo al diagrama de flujo para cuantificar las entradas y salidas de materia y energía de cada proceso unitario.
- ✓ Descripción de las técnicas de recopilación de datos (referenciar si es necesario) y cálculo utilizados.
- ✓ Cumplir con los requisitos de calidad de datos de acuerdo a la NMX-SSA-14044-IMNC-2008, inciso 4.2.3.6.

Ver en el Anexo 2 formatos de:

2A. Hoja de datos para procesos unitarios.

2B. Hoja de recopilación de datos de análisis del inventario de ciclo de vida.

Datos y Cálculos

- ✓ Validación de los datos, mediante un balance de materia y energía.
- ✓ Documentación de procedimientos de cálculo y suposiciones realizadas.
- ✓ Relación de los datos a los procesos unitarios referidos a MWh.
- ✓ Si es necesario realizar ajuste de los límites del sistema, documentando el proceso de ajuste y del análisis de sensibilidad (NMX-SSA-14044-IMNC-2008, inciso 4.3.3.4).
- ✓ Estimación de las emisiones a la atmósfera. (ver Anexo 2C. Hoja de datos cálculo de emisiones por unidad operacional).

Folio No. 0055

5.2.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO

La metodología propuesta para calcular el efecto de los impactos sobre el ambiente se describe a continuación.

Asignación de Categorías de Impacto

- ✓ Asignación de los resultados del inventario de ciclo de vida a las categorías de impacto de acuerdo con la Tabla 5.2.
- ✓ Conversión de los resultados a unidades comunes utilizando factores de caracterización; indicando el método, así como los juicios de valor y suposiciones utilizadas.
- ✓ Compilar los resultados de indicadores de categoría, para cada categoría de impacto (perfil de la EICV)
- ✓ Realizar una lista de resultados de inventario, con flujos elementales, que no se les asigno ninguna categoría.
- ✓ Convertir los resultados de los indicadores de las diferentes categorías de impacto mediante factores numéricos basados en un juicio de valor (Eco-indicador 99).

5.2.5. INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

- ✓ Compilación de la información.
- ✓ Identificación de las entradas y salidas de acuerdo a las Fases de Implementación del Ciclo de Vida. (ver Anexo 2D)
- ✓ Identificación de la contribución de los impactos de acuerdo a los procesos unitarios y las categorías de impacto (ver Anexo 2E).
- ✓ Evaluación del ICV y el EICV por medio de las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia.
- ✓ Conclusión de acuerdo a los resultados obtenidos.
- ✓ Formulación recomendaciones con base en los resultados obtenidos
- ✓ Realizar un informe coherente con los resultados del ACV y con el objetivo y alcance planteados.

Folio No. 0056

Tabla 5.2 Categorías de Impacto Ambiental a Considerar en el Sector Eléctrico Mexicano en el Periodo 2010 -2012

Categoría de Impacto	Escala	Inventario del Ciclo de Vida	Factor de Caracterización Común	Descripción del Factor de Caracterización	Año de implementación
Calentamiento Global	Global	Dióxido de carbono (CO_2) Óxido nitroso (N_2O) Metano (CH_4)	Potencial de Calentamiento Global	Conversión de datos del inventario a dióxido de carbono equivalente (CO_2e)	2010
Smog Fotoquímico	Local	Hidrocarburos No Metánico s (HCNM)	Potencial de creación de oxidantes fotoquímicos	Conversión de datos del inventario a etano equivalente (C_2H_6)	2010
Acidificación	Regional/ Local	Óxidos de azufre (SOx) Óxidos de nitrógeno (NOx)	Acidificación potencial	Conversión de datos del inventario a iones de hidrógeno equivalentes (H+)	2010
Eutroficación	Local	Óxidos de azufre (SOx) Óxidos de nitrógeno (NOx)	Eutroficación potencial	Conversión de datos del inventario a fosfatos equivalentes (PO_4)	2010
Toxicidad Terrestre	Local	Toxicidad química con concentración letal reportada para roedores	LC_{50}	Conversión de datos LC_{50}* a su equivalente	2011
Toxicidad Acuática	Local	Toxicidad química con concentración letal reportada para peces	LC_{50}	Conversión de datos LC_{50}* a su equivalente	2011
Salud Humana	Global Regional Local	Emisiones al aire, agua y suelos	LC_{50}	Conversión de datos LC_{50}* a su equivalente	2012

* LC_{50} es la concentración a la cual el 50% de la población muestra mueren en un periodo definido.

Fuente: World Energy Council, 2004

Folio No. 0057

5.3. Estimación de emisiones a la atmósfera

Para el cálculo de las emisiones de CO_2 de las diversas tecnologías fósiles es necesario conocer parámetros genéricos de cada tecnología, los cuales se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Parámetros genéricos por tecnología de generación

Tecnología	Combustible	Factor IPCC ($MtCO_2/GWh$)	Factor de Planta (%)	Capacidad por Unidad (MW)
Ciclo combinado	Gas	0.3863	80	700
Ciclo combinado con CCS	Gas	0.05	80	700
Carbón supercrítica	Carbón	0.7904	80	700
Carbón supercrítica con CCS	Carbón	0.116	80	700
IGCC	Carbón	0.757	70	700
IGCC con CCS	Carbón	0.113	70	700

Fuente: CMM con información del POISE y del IPCC

Para calcular la generación eléctrica anual de cada tecnología se tiene la siguiente ecuación:

Generación Anual (MWh)= Capacidad (MW) x Factor de Planta/100 x 8760 h/año

Una vez obtenida la generación anual de energía eléctrica, se pueden estimar las emisiones por tecnología de acuerdo a la ecuación siguiente:

Emisiones (t CO_2)= Factor de Emisión ($MtCO_2/GWh$) x Generación anual (MWh)

El factor de emisión (FE) establece la relación directa entre las emisiones generadas y el combustible utilizado.

5.4. Métodos para calcular el valor de la reducción de emisiones

Existen básicamente dos aproximaciones para calcular el valor de la reducción de emisiones: la estimación directa del daño ambiental y el valor de los costos de mitigación.

Folio No. 0058

5.4.1. ESTIMACIÓN DIRECTA.

La estimación directa del daño requiere calcular valores que pueden ser vinculados a la emisión de un contaminante criterio o de efecto invernadero, expresado en una unidad monetaria.[33] Por ejemplo, la valoración económica monetizada de la salud humana y los efectos ambientales relacionados con la combustión de carbón en plantas de generación de energía eléctrica[34], incluyen la muerte prematura, costos en tratamientos de salud, potencial de catástrofes naturales inducidas por el calentamiento global, entre otros.

La estimación directa puede ser extremadamente compleja, pues muchos de los efectos resultan casi imposibles de cuantificar, particularmente considerando un enfoque que incluya las interacciones físicas y químicas entre los contaminantes, y otros como los efectos del cambio climático (escasez de agua, productividad de los sistemas agrícolas, salud humana, entre otros)[35] no han sido completamente entendidos en cuanto a las interrelaciones que existen entre el sistema climático y el ambiente natural (ver Tabla 5.4). Adicionalmente, existen importantes incertidumbres al utilizar este método, pues muchos de los costos asociados al cambio climático requieren de supuestos éticos, como son la equidad intergeneracional[36].

Tabla 5.4 Metodología Vías de Impacto para la valoración directa de los daños ambientales (efectos seleccionados)

Impacto	Daño ambiental	Efecto
Mortalidad	PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3, NOx	Reducción en la expectativa de vida debido a la exposición de corto y largo plazo
Morbilidad	PM_{10}, $PM_{2.5}$, O_3, SO_2, NOx	Admisiones al hospital, días de actividad restringida, enfermedades cardiovasculares, tos crónica, bronquitis, asma, otros
Infraestructura	SO_2, deposición ácida	Oxidación de metales, cantera, granito, pintura, yeso, cemento
Agricultura	NO_x, SO_2, O_3	Cambios en el rendimiento para distintos productos, efectos fertilizantes
Calentamiento global	CO_2, CH_4, N_2O	Efectos globales sobre la mortalidad, morbilidad, impactos costeros, agricultura, demanda de energía
Ecosistemas	Deposición ácida, SO_2, NO_x, NH_3	Acidificación, eutroficación

Fuente: ExternE, 2005

[33] Hohmeyer, O. 1988. Social Costs of Energy Consumption: External Effects of Electricity Generation in the Federal Republic of Germany. Berlin. Springer-Verlag. y Ottinger *et al* 1990. Environmental Costs of Electricity. New York. NY. Oceana Publications. Inc.

[34] Cavanagh, R. *et al*. 1982. Part IIIA2E: Environmental Costs. In A model Electric Power and Conservation Plan for the Pacific Northwest. Northwest Conservation Act Coalition.

[35] European Comission. ExternE. Externalities of Energy. Vol. 8. Global Warming. 1999 y ExternE. Externalities of Energy. Methodology 2005 Update. Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. European Commission.

[36] Stern. N. Economics of Climate Change. American Economic Review: Papers & Proceedings 2008, 98:2, –37

Folio No. 0059

Se reconoce que México tendría que avanzar en caracterizar el daño ambiental por la vía de impacto o costos de daño ambiental directos, al menos para los costos externos asociados a la contaminación del aire local y regional, pues muchos de los impactos son específicos del lugar y requieren de mayor nivel de detalle, mismo que puede ser alcanzable a nivel de instalación con relativa sencillez utilizando las metodologías desarrolladas por ExternE (2005).

5.4.2. ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LOS COSTOS DE MITIGACIÓN

El enfoque de costos de mitigación se refiere básicamente al costo de cumplir con un objetivo de reducción, o cumplimiento de estándares de emisión como las Normas Oficiales Mexicanas, como sucedáneos de los costos externos asociados[37] a la exposición a un contaminante, o gas específico. Este enfoque, también llamado de preferencias reveladas, asume:

- Los entes reguladores incorporan las preferencias sociales del control de emisiones. Es decir, los reguladores a través de distintos instrumentos normativos y económicos buscan minimizar el impacto ambiental.
- Los costos marginales de mitigación son conocidos y éstos son incurridos para reducir las emisiones de un contaminante en específico.
- No hay otros beneficios más que la reducción de emisiones.
- Las normas de calidad ambiental relacionadas con salud y la protección ecológica son suficientemente estrictas para proteger la salud de las personas y los ecosistemas[38].

Además de las diferencias metodológicas entre estos dos métodos, existen variaciones importantes en los valores obtenidos determinados fundamentalmente por la densidad poblacional, condiciones geográficas y meteorológicas, en el caso de la valoración del daño ambiental, frente a las dificultades que presenta la estimación del valor de los costos de mitigación, como lo es la, rigidez en la actualización de las normas de calidad ambiental y de estándares de emisión, entre otros factores.

Al mismo tiempo, ambas metodologías tienen la incertidumbre de llevar hacia delante errores de cálculo, tanto del valor del daño ambiental, como el costo de mitigación. Adicionalmente, considerando el enfoque amplio del análisis del ciclo de vida, estos problemas sólo se agravan al tener que hacer aproximaciones de cada uno de los impactos ambientales asociados a cada proceso asociado a cada tecnología de generación de electricidad (emisión, impacto, exposición, consecuencias y costos asociados), por lo que llevar a cabo la valoración de externalidades de todo el sector eléctrico de nuestro país usando esa metodología resultaría en un proceso demasiado largo, y sin necesariamente ser más preciso.[39]

[37] Stern. N. Op Cit., ExternE 2005 Op Cit., y Voss, A. LCA and External Costs in Comparative Assessment of Electricity Chains. Decision Support for Sustainable Electricity Provision? Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. University of Stuttgart
[38] Chernick, P. and E.Caverhill 1989. The Valuation of Externalities from Energy Production, Delivery and Use: Fall 1989 Update. A Report by PLC, Inc. to the Boston Gas Co. December 22.
[39] Koomey, J. and F. Krause. Introduction to Environmental Externality Costs. US Department of Energy. 1997

Folio No. 0060

Para propósitos de este documento se utiliza el costo de mitigación como enfoque de trabajo amplio, siguiendo las recomendaciones de los estudios más actuales en cuanto a la valoración económica del cambio climático, dando homogeneidad metodológica, y reduciendo las incertidumbres que podrían ser obtenidas por la vía de impacto.[40]

Dicho lo anterior, para establecer el valor de la reducción de emisiones utilizamos las siguiente fórmulas:

Valor de las Emisiones ($) = Emisiones ($tCO_2$) x Costo de Mitigación ($/tCO_2$)

Los costos de las externalidades tienen que ser normalizados a una unidad común de referencia. La principal unidad de nuestro interés es la energía suministrada, expresada en kWh:

Valor de las Emisiones ($/kWh) = Valor de las Emisiones Anuales ($)/Generación Anual (kWh)

La Figura 5.6 muestra el procedimiento propuesto para la estimación del costo de mitigación de las emisiones de CO_2 en el Sector Eléctrico en México. El costo de mitigación de gases de efecto invernadero puede tener una variación muy amplia, dependiendo de las opciones tecnológicas que se escojan como referencia a una central eléctrica en operación. Por ejemplo, El costo de mitigación de la central termoeléctrica de Tuxpan, la principal emisora de CO_2 del país, que opera con combustóleo puede calcularse como el costo de cambiar a gas natural (*fuel switching*), realizar una captura de CO_2 en chimenea y almacenamiento geológico del mismo (CCS) o sustituir esa planta por una o varias plantas nuevas de alta tecnología (Solar térmica, IGCC, SCPC o Oxi-fuel, entre otras).

[40] Stern. N. Op Cit., ExternE 2005 Op Cit., y Voss, A. LCA and External Costs in Comparative Assessment of Electricity Chains. Decision Support for Sustainable Electricity Provision? Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. University of Stuttgart

Folio No. 0061

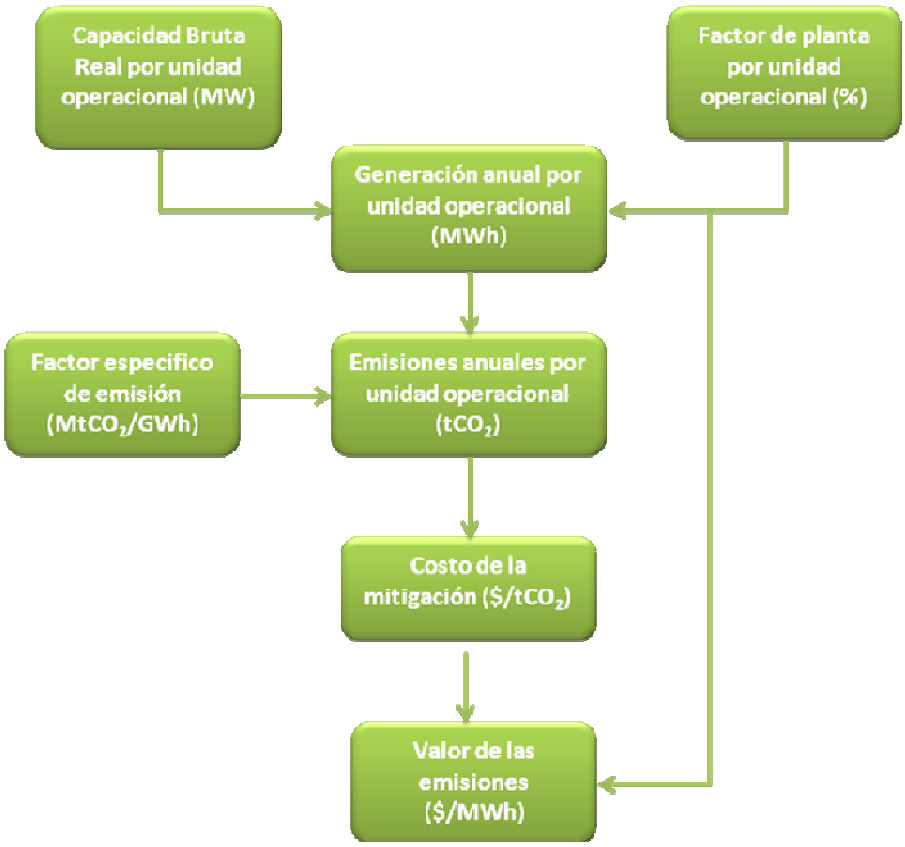


Figura 5.6 Procedimiento para la Estimación del Costo de Mitigación del CO_2 en el Sector Eléctrico en México

Fuente: CMM 2009

Los costos obtenidos de mitigación deben traducirse a valor presente aplicando una tasa de descuento en todas las categorías de impacto. El valor final de las externalidades podrá variar de acuerdo a la decisión sobre la tasa de interés a utilizar, por lo que es conveniente hacer un análisis de sensibilidad para las tasas elegidas que pondere el bienestar de las generaciones actuales y futuras[41].

Para obtener el valor presente del costo de las externalidades se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sum_{t=0}^{n} ve_{it} \cdot \rho^{t}$$

[41] Hellweg, S. y R. Frischknecht. Evaluation of Long-Term Impacts in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment. Volume 9, Number 5. September, 2004

Donde:

ρ = 1 / (1+ r)

r = tasa de descuento elegida

n = número de años del ciclo de vida

t = año de la emisión asociada al proceso de generación de electricidad

ve_{it} = valor de las emisiones en el año t utilizando la tecnología i

El valor de las emisiones será igual a cero, si no utiliza ninguna tecnología que permita mitigar las emisiones a la atmósfera bajo un esquema "*business as usual*" (BAU) o escenario tendencial, permitiendo hacer comparaciones entre las tecnologías, y las opciones de política correspondientes.

Folio No. 0063

6. RECOMENDACIONES EN APOYO AL ACV INICIAL BASADO EN LA GENERACIÓN

En apoyo a la aplicación inicial del ACV sólo en la fase de generación de energía eléctrica, se considera necesario desarrollar una normatividad específica para aquellas emisiones no reguladas ni reportadas en la industria eléctrica nacional, en particular sustancias tóxicas, sustancias agotadoras de la capa de ozono así como gases y partículas de efecto invernadero.

Igualmente, y reconociendo la existencia de un parque de generación de antigüedad muy diversa en la CFE, LyFC, los Productores Independientes de Energía y los cogeneradores, como PEMEX, resulta de interés nacional llevar a cabo los inventarios detallados de ciclo de vida como parte de las COAs y de acuerdo a las normas mexicanas referidas, de preferencia a partir del 2010, para confirmar el cumplimiento de lo ya normado en cada una de las instalaciones del sector y preparar al sector mismo en el trabajo del ACV.

Para atender la demanda de energía eléctrica en México, para el futuro y hasta una meta inicial al año 2030, se ha considerado prudente el poder “descarbonizar” la generación de energía eléctrica, incluyendo toda la generación de fuentes renovables posible y razonablemente económica, disminuyendo la generación a base de petróleo hasta lograr una participación marginal de este combustible, que quedaría destinado sólo a los sistemas aislados del Sistema Interconectado Nacional (SIN). La energía nuclear y de carbón (unidades supercríticas y ultracríticas, así como IGCC) con captura y almacenamiento geológico de carbono, podrían completar las necesidades de expansión y respaldo del SIN.

A la luz de los lineamientos para la programación del Sector Eléctrico se recomienda analizar las fuentes alternativas de energía y para cada una de ellas, definir una meta de mediano plazo, así como un catálogo de proyectos disponibles, su potencial y sus limitantes. Esta información permitirá optimizar la generación de la electricidad y lograr un ahorro de energía, alcanzando tres objetivos principales:

- Satisfacer la demanda que se anticipa de acuerdo a las tasas de crecimiento esperadas para el país en el horizonte 2008 - 2030.
- Considerar en una primera etapa aquellas tecnologías que son conocidas y maduras para el Sector, pero reconocer la conveniencia de incorporar también nuevas tecnologías.
- Priorizar las opciones energéticas de cero o baja emisión de GEI a fin de atenuar el cambio climático

A la luz de la nueva **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética**, resulta de interés comentar sobre la directriz actual en el Sector Eléctrico de generación al menor costo y la carencia de normatividad sobre emisiones de CO_2.

El Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE) elaborado por la Comisión Federal de Electricidad establece que la capacidad adicional requerida para los

Folio No. 0064

próximos 10 años se puede obtener combinando de diversas maneras las tecnologías disponibles. De acuerdo a este principio, la “mezcla óptima” es la que permite satisfacer la demanda prevista a costo global mínimo, con el nivel de confiabilidad establecido por CFE y cumpliendo con los lineamientos de política energética nacional y la normativa ambiental.

Como es conocido, la generalidad de las tecnologías que reducen o no emiten gases de efecto invernadero producen energía eléctrica más cara comparada con la producida con fuentes fósiles, y si a esto se agrega que no hay normatividad sobre la emisión del CO_2, entonces no existen ni los incentivos ni la obligación de controlar las emisiones de este gas. Por lo tanto es necesario definir los incentivos para el desarrollo de las tecnologías antes mencionadas, así como para el establecimiento de normas sobre las emisiones de CO_2. Las barreras para la implantación de nuevas tecnologías no son siempre económicas. Para vencer estas barreras, una regulación y unas normas bien diseñadas son frecuentemente las medidas políticas más efectivas. La mayoría de las nuevas tecnologías tienen costos superiores a las convencionales y es generalmente a través del aprendizaje tecnológico en la utilización de éstas que con el transcurso del tiempo, los costos se reducirán y la tecnología se adaptará mejor a su mercado (proceso descrito también “curva de aprendizaje”).

Actividades complementarias que pueden ser importantes ante un despliegue en la construcción de Unidades de Generación Eléctrica con tecnologías avanzadas y de baja o nula emisión de carbono, son las siguientes:

- Información sobre sitios potenciales estudiados para la instalación de diversas tecnologías de cero o bajas emisiones de CO_2, incluyendo la identificación de lugares potenciales para el almacenamiento geológico de carbono. Se considera fundamental que en México exista un catálogo con los diferentes sitios que las entidades involucradas hayan seleccionado, debidamente estudiados en todos sus aspectos meteorológicos, ambientales, oceanográficos, geotécnicos, sismológicos, hidrológicos y de acceso y comunicaciones, entre otros.
- Determinar los potenciales de instalación de capacidad y generación de energía eléctrica, sea para los recursos geotérmicos, nucleares, mini hidráulicos, solares-térmicos, eólicos, así como para la identificación de los lugares donde pueda almacenarse apropiadamente el CO_2 (Atlas de CCS) para los futuros proyectos que dispondrán de los sistemas de captura y almacenamiento geológico de carbono.
- Evaluar la necesidad de infraestructura industrial y recursos humanos apropiados y suficientes; en aspectos organizacionales, de ingeniería, construcción y manufactura.
- Financiamiento continuo y suficiente.
- Precio de venta real de la energía eléctrica o eliminación de subsidios.
- Difusión de información a la Opinión Pública. Las autoridades mexicanas necesitarán conducir las campañas necesarias para lograr una conexión clara y convincente entre la necesidad urgente de atenuar los cambios climáticos que actualmente ya es ampliamente reconocida y los proyectos concretos que se requieren para lograrlo, los cuales frecuentemente enfrentan una oposición pública.

Folio No. 0065

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTE-The Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2009. The Hidden Costs of Electricity: Externalities of Power Generation in Australia.
2. Bauer C., Dones R., Heck T. y Hirschberg S., 2007. *Comparative environmental assessment of current and future electricity*. Instituto "Paul Scherrer". Laboratorio de Análisis de Sistemas Energéticos. Suiza.
3. Baumol, W y Oates W.. *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press. 1975.
4. Cavanagh, R., 1982. *Part IIIA2E: Environmental Costs. In A model Electric Power and Conservation Plan for the Pacific Northwest*. Northwest Conservation Act Coalition.
5. Chernick, P. and E.Caverhill 1989. *The Valuation of Externalities from Energy Production, Delivery and Use: Fall 1989 Update*. A Report by PLC, Inc. to the Boston Gas Co. December 22.
6. European Commission, 1999. *ExternE. Externalities of Energy*. Vol. 8. Global Warming.
7. European Commission, 2005. *ExternE. Externalities of Energy. Methodology 2005 Update*. Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems.
8. European Environment Agency, 1997. *Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources*.
9. Hohmeyer, O. 1988. *Social Costs of Energy Consumption: External Effects of Electricity Generation in the Federal Republic of Germany*. Berlin. Springer-Verlag.
10. Frans H. Koch, 2000. *Hydropower-Internalized Cost and Externalized Benefits*. International Energy Agency (IEA)-Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programs, Ottawa, Canada, 2000.
11. Frischknecht R. y Jungbluth N., 2000. *Globale Umweltkriterien für Ökostrom*. Reporte elaborado por *ESU-services* para la Asociación Suiza para la Electricidad Ambientalmente Sustentable.
12. Kahneman, D. and J. Knetsch, 1992. *Valuing Public Goods: The Purchase of Moral Satisfaction*. Journal of Environmental Economics and Management, 22, págs. 57-70.
13. Krutilla, J., 1967. *Conservation Reconsidered*. American Economic Review. 57, págs. 787-96.
14. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.
15. Mishan E. J., 1969. *The Relationship between Joint Products, Collective Goods and External Effects*. Journal of Political Economy LXXVII (Mayo / Junio, 329-48. págs. 342-3.
16. Murphy, J. et al. *The cost of crop damage caused by ozone air pollution from motor vehicles*. Journal of Environmental Management (1999) 55, págs. 273–289.

Folio No. 0066

17. NMX-SSA-14044-IMNC-2008 ó ISO 14044:2006. Gestión ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices.
18. NOM-004-NUCL-1994. Clasificación de los Desechos Radioactivos.
19. NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales.
20. NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos.
21. NOM-085-SEMARNAT-1994. Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas - Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.
22. Ottinger et al 1990. *Environmental Costs of Electricity*. New York. NY. Oceana Publications. Inc.
23. PRé Consultants, 2000. *Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Impact Assessment. Manual for Designers*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. The Netherlands. October 2000.
24. SEMARNAT-CEPAL, 2004. Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México.
25. Sojo A., González M. y Suppen N., 2004. Un Nuevo Nivel de Evaluaciones Ambientales: El ACV.
26. Stern. N., 2008. *Economics of Climate Change*. American Economic Review: Papers & Proceedings 2008.
27. Suppen N. y Van Hoof B., 2005. Conceptos Básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecosdiseño. Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable.
28. U.S. Eviromental Protection Agency. PRé Consultants. Análisis de Ciclo de Vida: Como Herramienta de Gestión Empresarial. Life Cycle Assessment: A guide to aproaches, experiences and information sources. Herramientas informáticas en Ecodiseño. Sitio web DANTES
29. Voss A., 2007. *LCA and External Costs in Comparative Assessment of Electricity Chains. Decision Support for Sustainable Electricity Provision?* Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. University of Stuttgart.
30. World Energy Council, 2004. *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment.*

Folio No. 0067

ANEXO 1. LISTA DE VERIFICACIÓN PARA UNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO

1. Tipo de Tecnología, Combustible y Capacidad Instalada

Ciclo Rankine (en ciclo simple)

- Combustóleo.
- Carbón.
- Gas natural.
- Geotermia.
- Uranio enriquecido.

Ciclo Diesel

- Máquinas de combustión interna que quemen diesel.
- Máquinas de combustión interna que quemen mezcla diesel-combustóleo.
- Máquinas de combustión interna que quemen combustóleo.

Ciclo Brayton

- Turbinas de gas que quemen gas natural.
- Turbinas de gas que quemen diesel.

Ciclo Combinado

- Turbinas de vapor/turbinas de gas que quemen gas natural.
- Turbinas de vapor/turbinas de gas que quemen diesel.

Reactores nucleares

- BWR Reactor de agua ligera en ebullición (actualmente en operación en Laguna Verde).
- PWR Reactor de agua ligera a presión.

Otras

- Eólica
- Solares
- Hidráulicas.

De acuerdo a la capacidad instalada (MW).

2. POR EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PRINCIPAL

- Ciclo abierto que puede utilizar agua de mar, río o laguna.
- Ciclo cerrado con torres de enfriamiento que pueden utilizar agua de río, laguna, pozos, aguas negras o aire.

Folio No. 0068

3. UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

- Precipitadores electrostáticos para el control de partículas sólidas (cenizas) comúnmente usados cuando se quema carbón.
- Filtros de bolsas (*bag filters*) para captura de cenizas comúnmente usados cuando se quema carbón.
- Lavadores de gases para el control de emisiones de SOx cuando se utiliza combustóleo o carbón con alto contenido de azufre.
- Equipos quemadores de baja emisión de NOx, equipos de recirculación de gases y combustión en dos etapas.
- Reductores selectivos no catalíticos para el control de emisiones de NOx.

4. SUPERFICIES REQUERIDAS PARA LA DISPOSICIÓN DE DESECHOS

- Para almacenamiento de ceniza volante (*Fly-Ash*) y de fondo.
- Para almacenamiento de yeso producto de los lavadores de gases de combustibles de alto contenido de azufre.
- Para el almacenamiento de desechos nucleares de alta y baja y media radiactividad.

5. SUPERFICIES REQUERIDAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

- Áreas requeridas para el desarrollo de campos eólicos.
- Áreas requeridas para el desarrollo de campos geotérmicos.
- Áreas requeridas para el desarrollo de campos solares.
- Áreas requeridas para el almacenamiento de carbono, en el caso de CCS.

6. COMBUSTIBLE.

- Contenido de azufre y asfaltenos en el combustóleo; azufre y porcentaje de cenizas en el carbón y azufre en gas.
- Consumo de combustible.
- Poder calorífico superior e inferior.
- Procedencia (nacional o importado).
- Transporte y distribución.

7. EFICIENCIA REAL VS EFICIENCIA DISEÑO DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN

- Expresado en porcentaje.
- Como consumo térmico unitario (*heat rate*).
- Presión y temperatura del vapor principal y en su caso, del vapor recalentado.
- Consumo de auxiliares (servicios propios) de la Unidad expresado en MW.

Folio No. 0069

8. NIVEL DE EMISIONES POR TIPO DE UNIDAD DE GENERACIÓN (toneladas anuales)

- NOx.
- SOx.
- Partículas sólidas.
- CO_2.
- Factores de emisión específicos calculados y basados en mediciones anuales.
- Procedimientos y metodología de cálculo de emisiones validadas y verificables.

9. COSTOS

- Costos de inversión.
- Costos de operación y mantenimiento.
- Costo total nivelado de generación.
- Otros:
  - Factor de planta.
  - Vida económica de la Unidad.
  - Periodo de construcción.
  - Desmantelamiento.
  - Tratamiento de desechos.

Folio No. 0070

ANEXO 2. FORMATOS PARA INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

ANEXO 2A. HOJA DE DATOS PARA PROCESOS UNITARIOS

Elaborado por:		**Fecha:**		
Identificación del proceso unitario:		**Lugar objeto del informe (ubicación dentro del proceso unitario):**		
Periodo de tiempo: año	**mes de inicio:**	**mes de finalización:**		
Descripción de proceso unitario (anexar diagrama de flujo y adjuntar, si se requiere, hoja adicional):				
Entradas de materia	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**	**Origen**
			listar procedimientos	nacional o importado
Consumo de agua	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**	**Origen**
			describir medición de flujo de agua	
Entradas de energía	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**	**Origen**
Eléctrica	MWh		medición directa	red eléctrica
Salidas de materiales (incluyendo productos)	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**	**Origen**
Energía eléctrica	MWh		medición directa	unidad de generación
Nota: Los datos en esta hoja de recopilación de datos se refiere a todas las entradas y salidas no asignadas durante el período especificado.				

Folio No. 0071

ANEXO 2B. HOJA DE RECOPILACIÓN DE DATOS DE ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Identificación de procesos unitarios:			**Lugar objeto del informe:** Sitio de la unidad
Emisiones al aire	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo (adjuntar hojas si es necesario)**
			listar procedimientos
Descargas al agua	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**
	m^3		describir medición y análisis
	℃		describir medición y análisis
	m^3		describir medición y análisis
			describir análisis fisicoquímicos
Descargas al suelo	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**
	t		describir medición y análisis
	t		
Otras emisiones o descargas	**Unidades**	**Cantidad**	**Descripción de los procedimientos de muestreo**
			describir medición y análisis
Describir cualquier cálculo, recopilación de datos, muestreo o variación (adjuntar hojas adicionales si es necesario)			

Folio No. 0072

ANEXO 2C. HOJA DE DATOS CÁLCULO DE EMISIONES POR UNIDAD OPERACIONAL

Nombre de la unidad operacional:					
Emisiones al aire	**Capacidad bruta (MW)**	**Factor de planta (%)**	**Generación anual (MWh)**	**Factor de emisión[1] (kg/kWh)**	**Emisiones (toneladas)**
	dato	dato	fórmula	AP-42	
Descargas al agua	**Capacidad bruta (MW)**	**Factor de planta (%)**	**Generación anual (MWh)**	**Emisiones (toneladas)**	**Factor de emisión (kg/kWh)**
				medición directa	
Descargas al suelo	**Capacidad bruta (MW)**	**Factor de planta (%)**	**Generación anual (MWh)**	**Emisiones (toneladas)**	**Factor de emisión (kg/kWh)**
				medición directa	
Otras emisiones o descargas	**Capacidad bruta (MW)**	**Factor de planta (%)**	**Generación anual (MWh)**	**Emisiones (toneladas)**	**Factor de emisión (kg/kWh)**
				medición directa	

generación anual (MWh): (8760 horas al día)*(factor de planta(%)/100))*capacidad bruta (MW)

[1]:indicar fuente o metodología

* AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Stationary Point and Area Sources. EPA-USA.

Folio No. 0073

ANEXO 2D. ESTRUCTURACIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DE UN ICV POR ETAPA DEL CICLO DE VIDA

Entrada/salida del ICV	Extracción (minería y molienda)	Preparación de combustible	Generación	Construcción	Desmantelamiento	Transmisión	Distribución
Combustible[a]	Fase 2	Fase 2	Fase 1 (consumo)	Fase 3	Fase 3	Fase 3	Fase 4
Agua[b]	Fase 2	Fase 2	Fase 1 (consumo)	Fase 3	Fase 3	Fase 3	Fase 4
Emisiones al aire[1]	Fase 2	Fase 2	Fase 1	Fase 3	Fase 3	Fase 3	Fase 4
Emisiones al agua[1]	Fase 2	Fase 2	Fase 1	Fase 3	Fase 3	Fase 3	Fase 4
Emisiones sólidos[1]	Fase 2	Fase 2	Fase 1	Fase 3	Fase 3	Fase 3	Fase 4

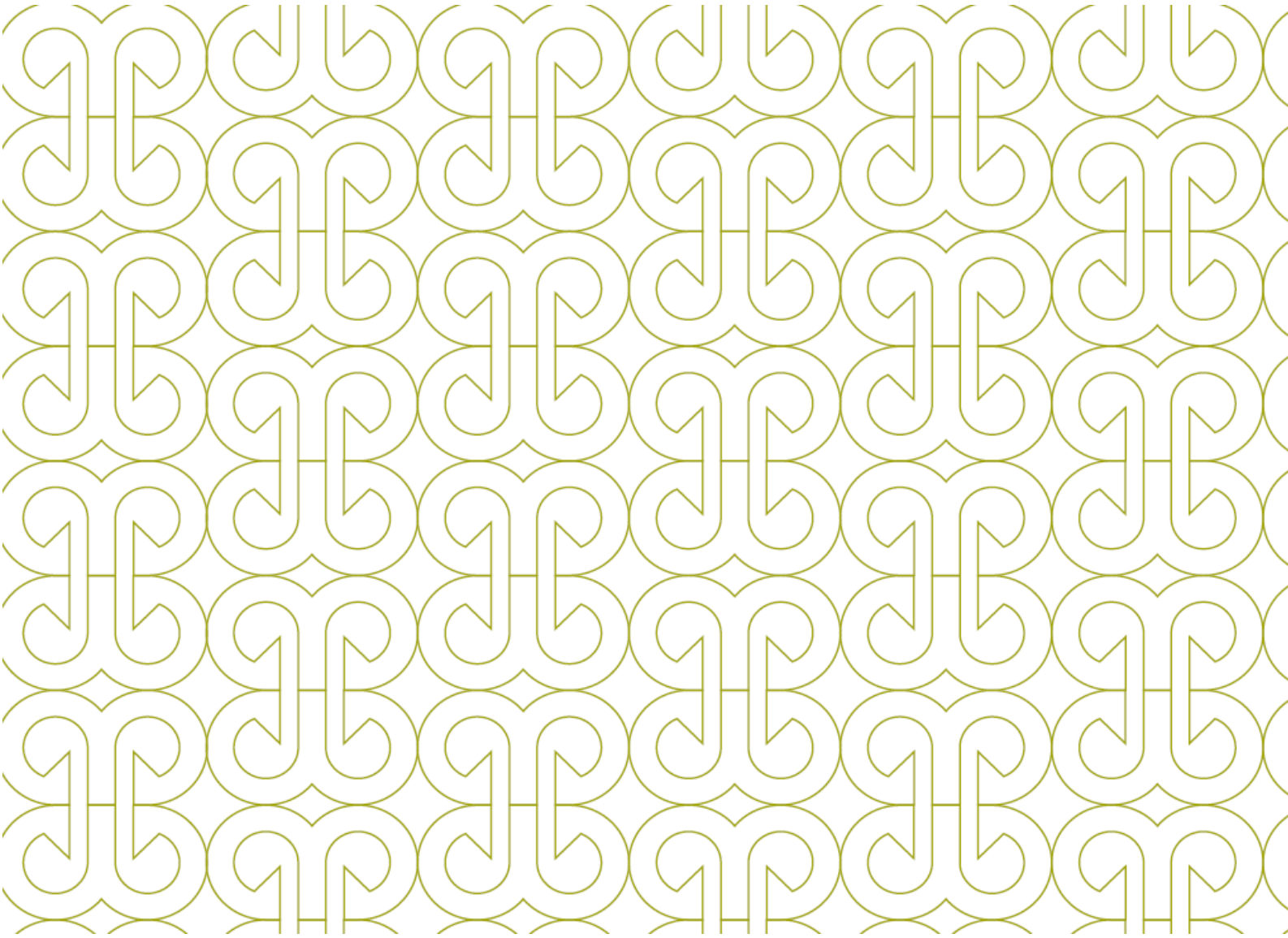
a: especificar todos los combustibles utilizados para cada etapa.
b: especificar la fuente y todas las entradas para cada etapa
1: todas las emisiones para cada etapa.

Folio No. 0074

ANEXO 2E. ESTRUCTURACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO DE UN ICV CON RESPECTO A LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Contaminante	Potencial de calentamiento (PCG_{100})	Potencial de creación de oxidantes fotoquímicos	Acidificación potencial	Eutroficación potencial	LC_{50} (Toxicidad Terrestre)	LC_{50} (Toxicidad Acuática)	LC_{50} (Salud Humana)
CO_2							
SOx							
NOx							
PM10							
PST							
CO							
CH4							
HCNM							
Sólidos*							
Líquidos*							
*todas las emisiones sólidas y liquidas cuantificadas							

Folio No. 0075

Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.
Paseo de los Laureles No 458 Int. 406
Col. Bosques de las Lomas 05120
México, D.F.
T: (+55) 9177.1670
F: (+55) 9177.1670 ext 114
www.centromariomolina.org

Folio No. 0076