

# CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA VINCULADAS CON ENERGÍA: REVISIÓN Y PROSPECTIVA

Niembro, J.,<sup>(P)</sup>; González, M.

## Abstract

The environmental pollution is one of the problems associated with the energy life cycle: generation, use and degradation. In the way to sustainability, one of the challenges in productive systems is the efficiency and development of technologies to minimize the negative impacts over the ecosystem and foster its economic profitability. The establishment phase of the LCA is the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) which values the magnitude and the significance of the environmental effects and classifies them into categories. Energy use, Depletion of abiotic resources, Mineral extraction and Fossil fuels are some of the LCIA's impact categories related to energy. The indicators have been developed to satisfy different needs, they get together in their orientation because of provide information related to energy generation. Nowadays new categories are being developed associated to the use and degradation of energy Such as: Cumulative Energy Demand Applying and Cumulative Exergy Demand. The present work makes a review of the impact categories related to energy, currently used and those being validated.

*Keywords: energy, impact categories, LCA, LCIA, exergy*

## Resumen

La degradación del medio ambiente es un problema asociado, entre otros, al ciclo de vida de la energía: generación, uso y degradación. En el camino hacia la sostenibilidad, uno de los retos es la búsqueda de eficiencia de los sistemas productivos y el desarrollo de tecnologías, para minimizar impactos negativos sobre el ecosistema y potenciar su rentabilidad económica, sin olvidar la componente social. En el establecimiento de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV) valora la magnitud y significancia de los efectos ambientales y los clasifica en categorías. Uso de la energía, agotamiento de recursos abióticos, extracción mineral y combustibles fósiles son algunas de las categorías de impacto de EICV relacionadas con la energía. Los indicadores se han desarrollado para satisfacer distintas necesidades y convergen en su orientación pues proveen información relacionada con la generación de la energía. Actualmente están en desarrollo nuevas categorías de impacto vinculadas al uso y degradación de la energía, tales como: Demanda de energía acumulada y Demanda de exergía acumulada. El presente trabajo hace una revisión de las categorías de impacto relacionadas con la energía, tanto las utilizadas actualmente como de las que se están validando.

*Palabras clave: energía, categorías de impacto, ACV, EICV, exergía*

## 1. Introducción

Los intereses de las sociedades cambian a lo largo de su evolución y desarrollo en función de sus necesidades preponderantes. La historia del hombre muestra que en las culturas, no impera el planeamiento sino la satisfacción inmediata y tal vez por ello es que llegan al ocaso o a su indiscutible degradación. Nuestra cultura no es la excepción, como lo muestran las proféticas palabras de Aurelio Peccei al inicio de los 70's [1]: "el momento de la verdad

se está acercando” y que parecieran que hoy, han perdido su eco. A la preocupación del Club de Roma sobre el problema de la pobreza, la degradación ambiental, el crecimiento urbano, el rechazo a valores sociales fundamentales y la inflación entre otros, dio respuesta el trabajo del grupo encabezado por Donella Meadows. Los “Límites del Crecimiento” [2], sentó las bases de lo que debería de haber sido la dinámica de crecimiento de un mundo finito. Durante 30 años el esfuerzo se ha diluido, el colapso producido por el agotamiento de los recursos no renovables, ya no es una preocupación inmediata. Como muestra de ello, la Comisión Europea [3], que indica que los impactos ambientales de la utilización de los recursos no renovables, como los metales, los minerales y los combustibles fósiles son de mayor preocupación que su eventual escasez. Da el ejemplo de los combustibles fósiles: los gases de efecto invernadero derivados de su utilización son un problema acuciante hoy, más que el riesgo de quedarse sin reservas. El programa de trabajo internacional del grupo Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [4] ni siquiera contempla en su agenda el tema del agotamiento de los recursos abióticos. Sólo algunas iniciativas han continuado el estudio del problema, iniciativas que se mostrarán más adelante. En el camino hacia la sostenibilidad, uno de los retos es la búsqueda de eficiencia de los sistemas productivos y el desarrollo de tecnologías, para minimizar impactos negativos sobre el ecosistema y potenciar su rentabilidad económica.

### **1.1 Energía**

El hombre descubrió el fuego y a partir de ese momento su mente se despertó, empezó a imaginar, a idear formas de aplicar su “descubrimiento” para mejorar su calidad de vida [5]. El fuego hizo posibles varias transformaciones químicas de la materia inanimada, como la fundición de metales, es así que comienza la primera época de relativa “alta tecnología” de la humanidad [6]. A su vez, se emiten los primeros contaminantes que han cambiando a lo largo de la historia del hombre. En un principio fueron sólo humo y olores, en la actualidad son un nuevo grupo de contaminantes producto de la cambiante sociedad urbana industrial, donde existe una carrera en el desarrollo tecnológico. La mayoría de los problemas de contaminación son resultado de las actividades industriales y de los medios de transporte, pero realmente el problema se remite al uso de la energía.

El desarrollo económico de las sociedades está ligado al consumo energético. Las actividades de los sectores Industria, Servicios y Transporte requieren del sistema de abastecimiento energético; el funcionamiento del sistema es el que impacta en la naturaleza. El sistema energético debe garantizar un suministro regular de energía, basado en recursos más o menos abundantes que puedan obtenerse a costes asequibles, debe ser de fácil transporte y con calidad energética para poder ser aplicado con eficiencia. Los sistemas energéticos se seleccionan en función de la disponibilidad técnica y la viabilidad económica [7]. Las actividades de generación (captación, transformación, transporte), uso y degradación de energía provocan impactos sobre el medio ambiente, tanto en relación con el agotamiento del recurso como en los efectos propios de la generación, uso y degradación.

### **1.2 Impactos asociados a los sistemas energéticos**

Los impactos de la generación y el uso de los recursos energéticos son comunes a la mayoría de los sistemas energéticos pero difieren en magnitud y significancia de acuerdo a condiciones espaciales y temporales, locales y globales.

Para evaluar el impacto de las actividades relacionadas con la energía se debe considerar el ciclo completo del sistema energético, para ello se han utilizado numerosas metodologías específicas de estudio de los impactos: estrategia Top-down, enfoque Bottom-up y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [7]. En esta comunicación se tratará esta última.

### 1.3 Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una de las técnicas desarrolladas para comprender y tratar los impactos asociados a los productos o servicios. Según la 14040 [8], el ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir de la cuna a la tumba). En general los impactos económicos y sociales están fuera del alcance de los ACV, aunque se pueden combinar con otras técnicas de análisis.

Los ACV se desarrollan en cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación. La evaluación de impactos es el núcleo central del análisis de ciclo de vida y representa una parte crítica del mismo.

“La magnitud y significancia de los costos sociales y medioambientales asociados a actividades específicas en un ciclo de vida se identifican durante la EICV” [9]. La fase de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) tiene por objetivo “proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario de ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender su importancia ambiental” [8]. La EICV es una técnica diferente a otras herramientas de valoración ambiental como la evaluación del desempeño ambiental, la evaluación de impacto ambiental y la evaluación de riesgo. El enfoque de las EICV está basado en una unidad funcional, no así las otras técnicas, aunque puede utilizar información recopilada por ellas. Los resultados de EICV son de naturaleza relativa e inútiles para predecir los impactos sobre el entorno.

En las EICV se seleccionan categorías de impacto e indicadores de categoría para reflejar los asuntos ambientales relacionados con el sistema del producto bajo estudio; los modelos de caracterización vinculan los resultados de los inventarios con los indicadores de categoría a través de factores de caracterización. El indicador de categoría es la representación cuantificable de una categoría de impacto de EICV.

En algunas ocasiones la metodología existente de EICV no es suficiente para cumplir el objetivo y el alcance que se ha definido para el ACV, y se tiene que generar una nueva metodología. Las metodologías para asociar de forma coherente y exacta los datos de los inventarios a los impactos potenciales no son aceptadas de manera general, ni son normas. Los modelos de categorías de impacto se encuentran en diferentes etapas de desarrollo.

La *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) define cuatro categorías de impacto claves en los ACV: salud del ecosistema, salud humana, agotamiento de recursos y bienestar social. Mientras que la Agencia Europea de Medio Ambiente identifica: recursos abióticos, recursos bióticos, uso de la tierra, calentamiento global, disminución de la capa de ozono, impactos ecotoxicológicos, impactos toxicológicos, oxidantes fotoquímicos, acidificación y eutrofización entre las categorías más importantes.

Diversos indicadores y categorías de impacto. Se utilizan para satisfacer distintas necesidades relacionadas con la evaluación de asuntos ambientales de interés y convergen en su orientación pues proveen información relacionada con los sistemas energéticos.

## 2. Objetivos

Revisión de las categorías de impacto de Evaluación de Ciclo de Vida utilizadas en algunas de las más reconocidas investigaciones publicadas a la fecha vinculadas con la energía, así como de las nuevas categorías que aún están en proceso de validación.

### 3. Categorías de Impacto vinculadas a la energía

#### 3.1 Recursos Abióticos

Se consideran recursos abióticos aquellos que rodean a los seres vivos y que junto con ellos conforman el ecosistema; los recursos abióticos son parte de la naturaleza. Incluyen todos los recursos “sin vida” que pueden ser explotados por el hombre entre ellos los recursos energéticos, que son del interés de esta comunicación.

La categoría de impacto “agotamiento de recursos abióticos” es un concepto que no se ha definido claramente aun, puesto que depende en gran medida del usuario, sus necesidades habilidades y expectativas de futuro. Se evalúa en el marco de la inmersión del usuario, en el concepto de sostenibilidad. Se considera que categorías de impacto tales como calentamiento global y acidificación destacan por encima de agotamiento de recursos abióticos con más fuerza por los elementos subjetivos que las influyen [10].

Según su fundamento, se pueden clasificar los indicadores de categoría de impacto de recursos abióticos de forma concreta y operativamente práctica, pero a la vez simplista ya que se generan indicadores con información parcial [10]. De acuerdo a cuatro tipos:

- Basado de energía o en masa,
- Basado el uso de los depósitos,
- Basado en las consecuencias futuras de las extracciones del recurso,
- Basado en la exergía consumida o la entropía producida.

Se ha planteado la importancia del problema del agotamiento de recursos abióticos en términos económicos, específicamente en términos del costo de daño consecuencia del agotamiento del recurso. Los resultados son abrumadores [10].

Otra clasificación [11], propone seis formas diferentes de la utilización de los impactos sobre los recursos abióticos en función de los objetivos y/o de los datos disponibles:

- No agregación (acumulación) y evaluación del agotamiento de recursos abióticos en la etapa de Caracterización de EICV (pero si en fases posteriores, por ejemplo, durante Ponderación),
- La agregación de las extracciones de recursos naturales en una masa base,
- La agregación y evaluación basada, en última instancia, en la cantidad de los recursos disponibles, o la supuesta parte de la reserva base que puede ser extraída económicamente, y de la tasa de extracción en el momento de la evaluación,
- La agregación y la evaluación basada en el costo asociado de la sustitución de la extracción actual y la mejora de los procesos (presuntamente) sostenibles,
- La agregación y evaluación basada en el contenido y/o conversión de energía y/o exergía,
- La agregación y evaluación basada en el impacto ambiental previsto del proceso de extracción de recursos debido al cada vez menor número de depósitos o fuentes de extracción nuevos en el futuro

Numerosas propuestas de categorías de impacto e indicadores de impacto relacionados con recursos abióticos se utilizan en las EICV [12], [13], [14] y [15]. Se desarrollan más adelante.

Ya que la energía y sus fuentes son un recurso abiótico, el estudio de su agotamiento desde la perspectiva de la EICV, sigue los mismos modelos. La tabla 1 muestra una síntesis de los modelos de caracterización de la metodología CML para calcular los indicadores de la

categoría “agotamiento de recursos abióticos”. La metodología CML, desarrollada en el Centro de Estudios Ambientales la Universidad de Leiden en los Países Bajos, aplica el valor máximo de las reservas y las tasas de extracción, que reflejan la gravedad del agotamiento de los recursos. Las ecuaciones de los modelos de caracterización tienen rasgos similares, pero tanto los factores de caracterización como la interpretación del resultado del indicador de la categoría son muy variables. Cada modelo cuenta con las tabulaciones de sus propios factores, no se anexan en esta comunicación, se pueden consultar en la bibliografía recomendada. Cada recurso se compara contra un recurso de referencia, por lo que el método sólo es operativo para los factores ya tabulados. Se han determinado factores específicos para distintos recursos energéticos sobre la base de los valores concretos de calores de combustión. La debilidad de la metodología radica en su enfoque ya que está basado en la estimación de las cantidades de las reservas restantes, algo difícil de definir por los requerimientos a futuro de los recursos. Además, el método no tiene en cuenta los distintos escenarios de extracción o tecnologías que estarán disponibles en el futuro. Para la síntesis de modelos de la tabla 1, hemos llamado AgoRA, al factor de Agotamiento de Recursos Abióticos.

Autor y año	Modelo de caracterización
Guineé, 1995 WRI, 1994 Berner, Lasaga, 1989	$\text{AgoRA} = \sum_i \text{ADP}_i \cdot m_i \quad (1)$ <p>Con <math>m_i</math> como la cantidad del recurso <math>i</math> utilizado en kg y ADP como el factor de caracterización “potencial de agotamiento abiótico” (ADP por las siglas en inglés de <i>abiotic depletion potencial</i>) definido como:</p> $\text{ADP} = \frac{1}{x} \quad (2)$ <p>Donde <math>x</math> puede ser los factores de caracterización:  <math>R_i</math> : reserva del recurso <math>i</math> en kg,  <math>R_{\text{ref}}</math> : reserva del recurso de referencia antimonio en kg,  <math>DR_i</math> : tasa de extracción del recurso <math>i</math> en <math>\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}</math>  <math>DR_{\text{ref}}</math> : tasa de extracción del recurso de referencia antimonio en <math>\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}</math></p> <p>Las unidades del indicador quedan definidas por el ADP</p>
Guineé, 1995	<p>Ligera modificación del modelo anterior para sistemas energéticos. Se aplica la ecuación (1) pero con corrección para recurso abiótico energía fósil “fe” (por las siglas en inglés de <i>fossil energy</i>):</p> $\text{ADP}_{\text{fe}} = \frac{DR_{\text{fe}}}{(R_{\text{fe}})^2} \cdot \frac{(R_{\text{Sb}})^2}{DR_{\text{Sb}}} \quad (3)$ <p>Donde:  <math>\text{ADP}_{\text{fe}}</math> es el potencial de agotamiento del recurso abiótico combustible fósil en unidades de kilogramos equivalentes de antimonio (Sb) por megajoules: <math>\text{kg}_{\text{Sb eq}} \cdot \text{MJ}^{-1}</math>.  <math>DR_{\text{fe}}</math> es la tasa de extracción o producción de energía fósil en <math>\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}</math>,  <math>R_{\text{fe}}</math> es reserva máxima de combustible fósil en MJ,  <math>R_{\text{Sb}}</math> es la reserva máxima del recurso de referencia Sb en kg,  <math>DR_{\text{Sb}}</math> es la tasa de extracción del recurso de referencia Sb en <math>\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}</math>,</p>

	Al aplicar (3) en (1), $m_i$ se expresaría en kg del recurso de referencia antimonio (Sb)
Finnveden, 1996	$\text{AgoRA} = \sum_i \text{factor}_i \cdot m_i \quad (4)$ <p>Con <math>m_i</math> como la cantidad del recurso <math>i</math> utilizado en kg y <math>\text{factor}_i</math> como el factor de caracterización del agotamiento del recurso abiótico <math>i</math>, basado en el contenido energético, con unidades de <math>\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}</math>. El indicador resultante está expresado en términos del contenido energético en MJ.</p>
Ayres, 1996	$\text{AgoRA} = \sum_i \text{factor}_i \cdot m_i \quad (5)$ <p>Con <math>m_i</math>, como la cantidad del recurso <math>i</math> utilizado en kg y <math>\text{factor}_i</math> como el factor de caracterización del agotamiento del recurso abiótico <math>i</math>, basado en el contenido exergético, con unidades de <math>\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}</math>, se define por:</p> $\text{factor}_i = \frac{\text{Ex}_i}{\text{MW}_i} \quad (6)$ <p>Donde:  <math>\text{Ex}_i</math>, es el contenido exergético de una mol del recurso <math>i</math> en unidades de <math>\text{MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}</math> y <math>\text{MW}_i</math> es la masa molar del recurso <math>i</math> en unidades de <math>\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}</math>.</p>
Strauss, 2006	$I = D \cdot U \quad (7)$ <p>El impacto calculado resultante del agotamiento de un recurso abiótico mineral en un proceso específico es <math>I</math>, tiene por unidades kg.</p> <p>Donde,  <math>D</math> es la tasa de agotamiento del recurso <math>x</math> (factor agotamiento), se define por:</p> $D_f = \frac{P}{R} \quad (8)$ <p>Con:  <math>P</math> como el promedio anual de la extracción del recurso virgen en <math>\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}</math>,  <math>R</math> como las reservas explotables demostradas y económicamente viables en kg;  <math>Y U</math> es el factor relación masa- reserva económica (factor uso), se define por :</p> $U_f = \frac{m}{R} \quad (9)$ <p>Con:  <math>m</math> como la cantidad de recurso virgen utilizado para determinado proceso en kg.  La expresión final se plantea en función de equivalentes, con el platino como el mineral de referencia.</p>

Tabla 2. Modelos de caracterización de Agotamiento de recursos abióticos

### 3.2 Uso del Recursos

El Ecoindicador 99 es otra de las metodologías de EICV comúnmente aceptada, fue desarrollada por un grupo consultor profesional de los Países Bajos. La categoría de impacto “Uso de recursos” es a grandes rasgos equivalente a la de “Agotamiento de recursos abióticos” de CML. El Eco-indicador 99 tiene en cuenta las tendencias a largo plazo de la reducción de la calidad de los recursos, sólo si el esfuerzo para extraer esos recursos aumenta. Las fuerzas del mercado garantizan la máxima calidad de los recursos explotados para cualquier escenario en el tiempo. El esfuerzo futuro para extraer el recurso se expresa en unidades de los excedentes de energía, es decir, la diferencia entre la energía que se necesita para extraer un recurso actualmente y en algún momento en el futuro, y el cálculo de los excedentes de energía del futuro se basa en una arbitraria multiplicación de la cantidad de un recurso que se ha extraído antes de 1990. La metodología tiene tres puntos débiles: a) se sustenta en la hipótesis de que no habrá cambios bruscos y discontinuos (positivos) en la disminución gradual de la calidad de los recursos; b) considera de igual importancia cualquier recurso mineral; c) no se considera la posibilidad de sustitución de un mineral por otro [16].

### 3.3 Demanda de energía acumulada

En algunas ocasiones es relevante añadir información al respecto de la suma total de energía fósil consumida por un sistema, siempre de acuerdo a los objetivos y el alcance del estudio de ACV. La información, además, puede ser segmentada por el tipo de fuente generadora de energía. Una forma simple para abordar el problema es la de sumar todos los consumos energéticos y multiplicarlos por el contenido energético del recurso, lo que proporciona un indicador que ofrece tanto información del consumo energético agregado del sistema, como también del agotamiento de determinada fuente de energía. Este planteamiento ya se había considerado en la metodología CML como se aprecia en la ecuación 4.

Otra forma de abordar un caso de ACV en el que una visión general del uso de la energía, es la de utilizar el método de la Demanda Energética Acumulada (DEA). Que consiste en la cuantificación de toda la energía consumida directa o indirectamente a lo largo del ciclo de vida del producto. Para cada etapa del ciclo de vida se puede considerar:

- Consumo directo de energía durante la extracción y transporte de las materias primas, la fabricación, distribución, utilización y tratamiento de los residuos del producto
- Consumo de energía asociada a los materiales
- Consumo indirecto de energía relacionado con las infraestructuras necesarias para utilizar el producto, como por ejemplo, la producción de electricidad, combustibles, maquinaria, camiones, etc.

En general, el método DEA expone toda la demanda, valorada como energía primaria, que se plantea en relación con la producción, uso y disposición de un producto servicio. Por lo tanto, es un indicador como tal, de los impactos ambientales en lo que respecta al rendimiento energético de los sistemas de generación de energía en su ciclo de vida.

Algunos estudios de ACV sobre sistemas de generación eléctrica [17] y [18], han utilizado el método DEA y ejemplifican el modelo de caracterización que se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$DEA_{total} = \sum_{proceso} DEA_{proceso} \quad (10)$$

$$DEA_{\text{proceso}} = \sum_{\text{material}} F_p \cdot (DEA_{\text{material}} \cdot m_{\text{material}}) \quad (11)$$

Donde:

$DEA_{\text{total}}$  es el indicador demanda acumulada de energía total de todo el sistema en estudio,

$DEA_{\text{proceso}}$  es la demanda acumulada de energía por proceso,

$DEA_{\text{material}}$  es la demanda acumulada de energía por materia prima o energía en un proceso,  $m_{\text{material}}$  su respectivo peso o cantidad,

y  $F_p$  es el factor de producción. Los factores  $F_p$  tienen un carácter empírico y depende de la naturaleza y el trabajo adicional requerido para utilizar el material en determinado proceso. Existen tabulaciones disponibles de ellos [17].

El método DEA permite una comparación simplificada de diferentes alternativas de diseño (comparando otros estudios de ACV), mediante la consideración de la energía como único aspecto ambiental. Pero el impacto ambiental de un producto o servicio no puede ser estimado sólo en función de la demanda energética. Este método solo tiene sentido en combinación con otros métodos. Sin embargo se recomienda tener especial cuidado para evitar la doble contabilización en el paso de la ponderación de los EICV [19] y así evitar las posibles transferencias de impactos ambientales entre distintas etapas del ciclo de vida.

### 3.4 Demanda de exergía acumulada

El uso de los recursos tanto energéticos como no energéticos en un sistema cerrado, ocasiona intrínsecamente la destrucción de la exergía, tal como lo manifiesta la segunda ley de la termodinámica. La exergía es una propiedad que determina el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía determinada en cierto estado especificado [20]. Los recursos utilizados en determinado proceso sólo se transforman, no se destruyen y pueden ser recuperados por el consumo de exergía desde otro recurso (con todo un rango de posibilidades). Por lo que hay que considerar la destrucción de la exergía como uno de los mayores problemas relacionados con la demanda de recursos. La demanda de exergía acumulada DExA se ha propuesto como un indicador de la calidad energética de los recursos [21]. DExA representa la eliminación total de exergía de la naturaleza en la generación de un sistema producto, agregando la exergía de todos los recursos necesarios. Además evalúa la calidad del tipo de recursos energético: químico, cinético, hidroeléctrica, nuclear, solar y de radiación térmica. La DExA es equivalente a la definición de consumo exergético acumulado (CExA) [22], ambas cuantifican la exergía total requerida para un producto.

La DExA se calcula al sumar el total de exergía requerida por un proceso durante un periodo de tiempo, tiene por unidades MJ eq · periodo<sup>-1</sup>.

$$DExA = \sum_i m_i \cdot Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j \cdot r_{ex,j} \quad (12)$$

Donde:

DExA es la demanda exergética acumulada por producto unitario o proceso en MJ-eq,

$m_i$  es la masa del recurso  $i$  en kg,

$Ex_{(ch),i}$  es la exergía por kg de sustancia en MJ-eq·kg<sup>-1</sup>,

$n_j$  es la cantidad del portador energía en MJ

y  $r_{ex}$  es la relación de exergía a energía del portador.



La DExA es similar al DEA, ya que evalúa el uso de la energía, se diferencia en que considera la calidad de la energía e incorpora materiales no energéticos, tales como minerales y metales. En el caso de energía no renovable, la DExA es muy similar al CED y comparable con categorías de impacto como “Uso de los recursos” (metodología Eco-indicador 99) y “Agotamiento de recursos abióticos” (metodología CML). Tiene por ventaja que al ser la exergía una propiedad inherente del recurso, es menos subjetiva y por tanto menos interviene factores de caracterización, algunas veces subjetivos. Sin embargo, la DExA no considera la disponibilidad o la escasez del recurso. Como consecuencia, hay gran diferencia en la ponderación con los citados indicadores. Además su principal fuente de incertidumbre es la composición (a veces desconocida) de los recursos minerales, tales como rocas y minerales.

#### 4. Conclusiones

A la sociedad moderna, se le presenta la paradoja sobre qué es más preocupante: el impacto ambiental derivado del uso de un sistema producto o la escasez del recurso por proporcionar ese mismo sistema producto. Aquellos que la asuman podrán desarrollar sus actividades sin reparo ético. Quienes no lo hagan, tendrán que seguir en la búsqueda de una solución que no parece tener respuesta pronta.

Se ha presentado la revisión de algunas de las categorías de impacto relacionadas con la energía, más utilizadas por los usuarios del ACV agotamiento de recursos abióticos, uso de la energía, demanda acumulada de energía y demanda acumulada de exergía. Ello ha permitido contrastarlas y evaluar tanto sus similitudes y diferencias como sus ventajas y desventajas.

No existe, ni metodología de EICV, ni categoría de impacto “única” o integral, para la valoración del impacto al medio ambiente, relacionada con energía. Ciertas metodologías (CML) tratan a la energía con el enfoque del agotamiento del recurso, la polémica surge con la definición de escasez y su caracterización. Algunas (Ecoindicador) evalúan los excedentes, para recuperar los recursos en el futuro y requieren de hipótesis específicas. Otras utilizan propiedades inherentes a las sustancias y son por tanto, más objetivos, pero parciales en su apreciación del sistema en estudio. Por todo ello, es que se debe buscar la utilización conjunta y complementaria de las metodologías. En algunos casos, tal como menciona ISO 14040, si fuera requerido por los objetivos y alcances del ACV, generar nuevos indicadores.

#### Referencias

- [1] Tommasoli, M., *“El desarrollo participativo: análisis sociales y lógicas de planificación”*, Lepala, Madrid, 2003.
- [2] Meadows, D.H.; Meadows, D.L.; Randers, J.; Behrens, W.W., *“Limits to growth”*, Potomac Associates, Washington DC, 1972.
- [3] EU Comisión, *“Towards a Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources”*, COM (2003) 572 final, 2003.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment, *“Ecosystems and Human Well-being: Síntesis”*, Island Press, Washington DC 2005.
- [5] FUSIÓN, “El hombre y el fuego”, *Revista electrónica mensual FUSION*, 156, 2006, <http://www.revistafusion.com/2006/septiembre/editor156.htm>, consultada en abril 2008.
- [6] Asimov I., *“Chronology of Science and Discovery”*, HarperCollins Publishers, 1989.

- [7] IDEA, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica, Análisis de Ciclo de Vida de ocho tecnologías de generación eléctrica”, Madrid, 2000.
- [8] UNE-ISO 14044 “Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principio y marco de referencia”, 2006.
- [9] Pennington D., Potting J., Finnveden G., Lindeijer E., Jolliet O., Ryedberg T., Rebitzer G., “Life Cycle Assessment part 2: Current impact assessment practice”, *Environ Int*, 30, 2004, pp. 721 – 739.
- [10] Steen B., “Abiotic Resource Depletion Different perceptions of the problem with mineral deposits”, *Int J LCA*, 11 vol especial1, 2006, pp. 49 – 54.
- [11] Guinée JB, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, van Oers L, Sleeswijk AW, Suh S, Udo de Haes HA, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ, “*Life cycle assessment – an operational guide to the ISO standards – Part 3: Scientific background*”, Centre for Environmental Studies (CML), Leiden University, Leiden, the Netherlands, 2001.
- [12] Guinée J.B. “*Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products; with a case study on margarinas*”, Thesis, Leiden University, Leiden, Netherlands, 1995.
- [13] Guinée J.B. “*Handbook of Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [14] Finnveden G., “*Life cycle assessment as an environmental systems analysis tool – with a focus on system boundaries*”, Licentiate thesis, AFR Report 137, Swedish Waste Research Council, Stockholm, Sweden 1996.
- [15] Strauss K.; Brent A.; Hietkamp, S., “Characterisation and Normalisation Factors for Life Cycle Impact Assessment Mined Abiotic Resources Categories in South Africa The manufacturing of catalytic converter exhaust systems as a case study”, *Int J LCA* 11, 3, 2006, pp.162 – 171.
- [16] Goedkoop M., Spriensma R., “*The eco-indicator 99 – A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report*”, Pré Consultants B.V., Amersfoort, Netherlands, 2000.
- [17] Wagner HJ., Pick E., “Energy yield ratio and cumulative energy demand for wind energy converters”, *Energy*, 29, 2004, pp. 2289–2295.
- [18] Gürzenich D., Wagner H.-J., “Cumulative energy demand and cumulative emissions of photovoltaics production in Europe”, *Energy*, 29, 2004, pp. 2297–2303.
- [19] Frischknecht R., Braunschweig A., Hofstetter P., Suter P., “Human health damages due to ionizing radiation in life cycle impact assessment”, *Environ. Impact Assessment*, 20, 2000, pp. 159 – 189.
- [20] Feidt M., “*Thermodynamique et optimisation des systèmes et procédés*”, Technique et documentation, France, 1996.
- [21] Bösch M.E., Hellweg S., Huijbregts M.A.J., Frischknecht R., Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database, *Int J LCA*, 12, 3, 2007, pp. 181–190
- [22] Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. “*Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*”, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1987.

## **Agradecimientos**

Esta comunicación ha sido elaborada en el marco del trabajo doctoral auspiciado por el Programa de Becas para Estudios de Posgrado del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT de México, el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) Campus Estado de México y la Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Departamento de Proyectos de Ingeniería.

## **Correspondencia** (Para más información contacte con):

Isabel Joaquina Niembro García

Universidad Politécnica de Cataluña. ETSEIB. Departamento de Proyectos de Ingeniería. Edificio H, Piso 10

Diagonal 647, 08028, Barcelona (España)

Phone: +34 934 01 19 73

Fax: + 34 934 01 19 73

E-mail: [joaquina.niembro@gmail.com](mailto:joaquina.niembro@gmail.com)

URL: <http://www.etseib.upc.edu>