



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Energía y Exergía: Enfoques hacia la Sostenibilidad mediante el Análisis de Ciclo de Vida

Autor: Isabel Joaquina Niembro García

Institución: Universidad Politécnica de Cataluña
E-mail: joaquina.niembro@gmail.com

Otros autores: Margarita González Benítez (Universidad Politécnica de Cataluña)



RESUMEN:

La degradación del medio ambiente es un problema asociado, entre otros, al ciclo de vida de la energía (generación, distribución, uso y degradación) y a las pérdidas de exergía (destrucción y desecho). En el camino hacia la sostenibilidad, la ingeniería tiene por retos: la búsqueda de eficiencia de los sistemas productivos y el desarrollo de tecnologías, para minimizar impactos negativos sobre el ecosistema y potenciar la rentabilidad económica, todo ello sin olvidar la responsabilidad social del sistema producto. Para ello se puede servir de diversas herramientas, entre ellas el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de efectividad comprobada. En el establecimiento de un ACV, la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV) valora la magnitud y significancia de los efectos ambientales y los clasifica en categorías. Se han desarrollado diversos indicadores de EICV relacionados con la energía y la exergía; satisfacen distintas necesidades pero convergen en su orientación, pues proveen información relacionada con el impacto específico de la energía de un sistema producto en el medio. Además los indicadores, permiten estimar la eficiencia energética del sistema producto y la calidad de la energía utilizada. El presente trabajo hace una revisión de algunas de las categorías de impacto relacionadas con la energía y la exergía: Agotamiento de Recursos Abióticos, Uso de recursos, Demanda de energía acumulada y Demanda de exergía acumulada. Muestra también, cómo los citados indicadores, apoyan las acciones hacia la sostenibilidad.



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 años 70 [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. “Nuestro futuro común” [3], fruto del trabajo de grupo encabezado por la entonces Primera Ministra de Noruega Gro Harlem Brundtland, reconoció en 1987, la necesidad del cambio en la forma de vida y de la interacción comercial, para evitar niveles de sufrimiento humano y degradación ecológica inaceptables; indicó que el desarrollo económico y social debe descansar en la sostenibilidad. Pero aun con las intenciones citadas, durante los últimos 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 [4], 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” -es decir se continúa con la visión de “fin de tubo”-. 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 [5], 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 Desarrollo Sostenible

El concepto de Desarrollo Sostenible surge en 1972, en Estocolmo, en la primera reunión mundial de medio ambiente: Conferencia Mundial sobre el Medio Humano. En 1980, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza dio a conocer la Estrategia Mundial de Conservación, donde se daba un enfoque sólo ambientalista al desarrollo sostenible. En 1983, la ONU estableció la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, con Gro Harlem Brundtland primero, Ministra de Medio Ambiente y después Primera Ministra de Noruega como líder. El grupo fue conocido como comisión Brundtland. Después de un trabajo de casi tres años alrededor del mundo en debates, estudios y audiencias se publicó “Nuestro futuro común”, conocido también como Reporte Brundtland. Se emitió una definición oficial del desarrollo sostenible: “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades”. Los conceptos claves de las políticas de desarrollo sostenible, según el Reporte Brundtland son dos: la satisfacción de las necesidades básicas de la humanidad y la medida en el desarrollo social y tecnológico que impactan directamente sobre los



recursos naturales. En conclusión se exhorta a iniciar una nueva era de desarrollo económico racional desde el punto de vista ecológico [6]. Lo criticable del Reporte Brundtland es su amplia agenda para el cambio, sin ofrecer herramientas para sortear los conflictos que se suceden antes de llegar a los objetivos.

En 1989 se inició la planeación del trabajo para la nueva Conferencia sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (ONU), expertos de todo el mundo trabajaron arduamente para la concertación de acuerdos y en 1992 en la Cumbre de Río de Janeiro, Brasil, se concretó la idea de sostenibilidad. La cumbre contó con la representación de 179 países –en un consenso mundial al más alto nivel-, los resultados fueron: la Declaración de Río, sobre medio ambiente y el desarrollo, en donde se especifican derechos y responsabilidades de las naciones y el programa Agenda 21, prototipo de las normas y rutas para llegar al desarrollo sostenible. Es el manual de referencia para las políticas empresariales y gubernamentales. El plan de acción está estructurado en 40 capítulos, representa la alianza global de la Humanidad para el medio ambiente y el desarrollo: el desarrollo sostenible, para los años 90 y para la primera parte del siglo XXI.

El concepto de desarrollo sostenible, sigue aun sobre la mesa pues es un concepto universal, libre de clasificaciones y sujeto de estudio y crecimiento, o “continuo desarrollo”. Así lo muestran las reuniones internacionales que se convocan de forma permanente, para definir mejor los alcances y pautas a seguir.

Establecida la necesidad de alcanzar un desarrollo sostenible, un problema asociado es la herramienta a utilizar para medir la eficacia de los procedimientos de gestión. La Agenda 21 reconoce esta necesidad e indica que la sostenibilidad se puede medir mediante la utilización de indicadores. Lo que permite comunicar de forma sencilla y comprensible, la necesidad de cambio de hábitos de consumo a la sociedad [7].

Si la sociedad en general y el ciudadano en particular es el motor del desarrollo sostenible pero no es capaz de descifrar los mensajes que le llegan a través de los indicadores, el ciudadano permanecerá impasible, con lo que el desarrollo humano continuará con las mismas pautas actuales, es decir, seguirá siendo insostenible para el medio ambiente.

Un indicador es un número o cifra única que representa el estado de un sistema mayor [8], en específico, los indicadores relacionados con energía y exergía –que se muestran en esta comunicación- se generan para interpretar de forma más clara el estado de un sistema estudiado mediante la herramienta de ciclo de vida.

1.2 Energía y Exergía

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 [9]. 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 [10]. 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 e 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 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 [11]. El ciclo de la energía: generación (captación, transformación, transporte), uso y degradación, provocan impactos sobre el medio ambiente, tanto en relación con el agotamiento del recurso como en la emisión de contaminantes y sus efectos secundarios.

La primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de la energía. Esta ley sólo afirma que un aumento en alguna de las formas de energía, está acompañado por una disminución en alguna otra forma, pero no enuncia ninguna restricción sobre los tipos de conversiones de energía que pueden ocurrir, no hace distinción entre el trabajo y el calor. Existe una diferencia muy importante entre el trabajo y el calor, diferencia que no se evidencia en la primera ley: teóricamente es posible convertir completamente el trabajo en calor, prácticamente es imposible convertir completamente el calor en trabajo sin modificar los alrededores [12].

La segunda ley de la termodinámica establece, qué procesos de la naturaleza pueden ocurrir o no. Se puede enunciar de diferentes formas equivalentes. Expresada en forma simple y relacionada con las máquinas térmicas, la ley indica que no es posible construir una máquina capaz de convertir por completo, de manera continua, la energía térmica en otras formas de energía. 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. En los procesos reales, la energía no es destruida, sino transformada en otras formas, cada vez menos aptas para realizar procesos reales. Es por eso que además de la energía, debe introducirse otra entidad física para caracterizar la calidad del tipo de energía en virtud de diversas consideraciones. La exergía es una propiedad que determina el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía determinada en cierto estado especificado [13]. 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 tanto, hay que considerar la destrucción de la exergía como uno de los efectos negativos relacionados con la demanda de recursos.

El concepto de exergía es producto del estudio termodinámico de las máquinas térmicas y consecuencia de las investigaciones de Sadi Carnot, Clausius, Gibbs, Evans y Tribus, entre otros. El término "exergía" es relativamente reciente, fue sugerido por Rant en 1953, para describir el trabajo máximo que se puede obtener a partir de un sistema termodinámico en condiciones ideales. La exergía es una propiedad de los recursos naturales, es útil en la sociedad y tiene un valor económico, es digna de estudio y consideración en los procesos. El paradigma aún no es reconocido en la ingeniería, menos aún en la sociedad; Wall comenta que, en el mundo de hoy, que funciona con combustibles fósiles, la segunda ley de la termodinámica puede ser la verdad científica en el siglo XXI [14].



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 norma ISO 14040, 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) [15]. 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 ambiental, 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” [16]. 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 un 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.

En el camino hacia la sostenibilidad, la ingeniería tiene por retos: la búsqueda de eficiencia de los sistemas productivos y el desarrollo de tecnologías, para minimizar impactos negativos sobre el ecosistema y potenciar la rentabilidad económica, todo ello sin olvidar la responsabilidad social del sistema producto. Para ello se puede servir de diversas herramientas, entre ellas el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de efectividad comprobada.

2. OBJETIVOS

Revisión y análisis 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 y exergía, así como su contribución a la valoración de la sostenibilidad de los sistemas.

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 [17]. Existen reconocidas propuestas de categorías de impacto e indicadores de impacto relacionados con recursos abióticos [18], [19], [20] y [21].

Steen clasifica a los indicadores de categoría de impacto de recursos abióticos, según su fundamento como [17]:

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

La clasificación expuesta es concreta y operativamente práctica, a la vez es simplista ya que se generan indicadores con información parcial. Permite el planteamiento de la importancia del problema del agotamiento de recursos abióticos, en términos económicos, específicamente en términos del costo del daño, consecuencia del agotamiento del recurso.



Guinné propone la clasificación en seis clases diferentes de indicadores de acuerdo a los impactos sobre los recursos abióticos, en función de los objetivos y/o de los datos disponibles [22]:

- 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 la 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 con viabilidad económica, 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.

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 (por las siglas en holandés de *Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden*), 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 bibliografía especializada. 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. En la síntesis de modelos expuestos en 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,	$\text{AgoRA} = \sum_i \text{ADP}_i \cdot m_i \quad (1)$ <p>Con m_i como la cantidad del recurso i utilizado en kg y ADP como el factor de caracterización “potencial de agotamiento abiótico” (ADP por</p>

1989	<p>las siglas en inglés de <i>abiotic depletion potencial</i>) definido como:</p> $ADP = \frac{1}{x} \quad (2)$ <p>Donde x pueden ser los factores de caracterización: R_i : reserva del recurso i en kg, R_{ref} : reserva del recurso de referencia antimonio en kg, DR_i : tasa de extracción del recurso i en $kg \cdot año^{-1}$ DR_{ref} : tasa de extracción del recurso de referencia antimonio en $kg \cdot año^{-1}$</p> <p>Las unidades del indicador quedan definidas por las unidades de 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> $ADP_{fe} = \frac{DR_{fe}}{(R_{fe})^2} \cdot \frac{(R_{Sb})^2}{DR_{Sb}} \quad (3)$ <p>Donde: ADP_{fe} es el potencial de agotamiento del recurso abiótico combustible fósil en unidades de kilogramos equivalentes de antimonio (Sb) por megajoules: $kg_{Sb\ eq} \cdot MJ^{-1}$. DR_{fe} es la tasa de extracción o producción de energía fósil en $kg \cdot año^{-1}$, R_{fe} es reserva máxima de combustible fósil en MJ, R_{Sb} es la reserva máxima del recurso de referencia Sb en kg, DR_{Sb} es la tasa de extracción del recurso de referencia Sb en $kg \cdot año^{-1}$, Al aplicar (3) en (1), m_i se expresaría en kg del recurso de referencia antimonio (Sb)</p>
Finnveden, 1996	$AgoRA = \sum_i \text{factor}_i \cdot m_i \quad (4)$ <p>Con m_i como la cantidad del recurso i utilizado en kg y factor_i como el factor de caracterización del agotamiento del recurso abiótico i, basado en el contenido energético, con unidades de $MJ \cdot kg^{-1}$. El indicador resultante está expresado en términos del contenido energético en MJ.</p>
Ayres, 1996	$AgoRA = \sum_i \text{factor}_i \cdot m_i \quad (5)$ <p>Con m_i como la cantidad del recurso i utilizado en kg y factor_i como el factor de caracterización del agotamiento del recurso abiótico i, basado en el contenido exergético, con unidades de $MJ \cdot kg^{-1}$, se define por:</p> $\text{factor}_i = \frac{Ex_i}{MW_i} \quad (6)$ <p>Donde: Ex_i es el contenido exergético de una mol del recurso i en unidades de $MJ \cdot kmol^{-1}$ y MW_i es la masa molar del recurso i en unidades de $kg \cdot kmol^{-1}$.</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 I, tiene por unidades kg. Donde,</p>

	<p>D es la tasa de agotamiento del recurso x (factor agotamiento), se define por:</p> $D_f = \frac{P}{R} \quad (8)$ <p>Con: P como el promedio anual de la extracción del recurso virgen en kg · año⁻¹, R como las reservas explotables demostradas y económicamente viables en kg; Y U es el factor relación masa- reserva económica (factor uso), se define por :</p> $U_f = \frac{m}{R} \quad (9)$ <p>Con: m 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 1. 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 [23].

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 al 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 con 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 [24]:

- 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.

Wagner y Gürzenich en sus estudios de ACV sobre sistemas de generación eléctrica [25] y [26], han utilizado el método DEA y ejemplifican el modelo de caracterización que se presenta en las siguientes ecuaciones:

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

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

Donde:

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

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

$DEA_{material}$ es la demanda acumulada de energía por materia prima o energía en un proceso,

$m_{material}$ su respectivo peso o cantidad,

y Fp es el factor de producción. Los factores Fp 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 [25].

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 [27] y así evitar las posibles transferencias de impactos ambientales entre distintas etapas del ciclo de vida.

4. CATEGORÍAS DE IMPACTO VINCULADAS A LA EXERGÍA

4.1 Demanda de exergía acumulada

Ayres, ha valorado sistemas con consideraciones energéticas, tal como lo muestran las ecuaciones 5 y 6 de la tabla 1 (en el marco de la metodología CML), Bösch ha desarrollado una metodología específica denominada: demanda de exergía acumulada DExA, que es en si misma un indicador de la calidad energética de los recursos [28]. 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) [29], 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⁻¹.

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

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⁻¹,

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 prácticamente igual al DEA 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 intervienen menos los 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.

5. 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 para 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.

El desarrollo sostenible es una necesidad inexcusable para la humanidad. Los índices e indicadores son la herramienta a utilizar para medir la eficacia de los procesos y de los procedimientos de gestión hacia el desarrollo sostenible.

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 objetivas, 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, se deberán 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] World Commission on Environment and Development. “*Our common future*”. New York, Oxford University Press, 1987.
- [4] EU Comisión, “*Towards a Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources*”, COM (2003) 572 final, 2003.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment, “*Ecosystems and Human Well-being: Síntesis*”, Island Press, Washington DC 2005.
- [6] Enkerlin E., Cano, G. “*Ciencia ambiental y desarrollo sostenible*”, International Thomson editores, México, 1997.
- [7] Guardiño Ferré, R. & González Benítez, M. 2003, "Indicadores de Desarrollo Sostenible", *Ingeniería Diseño Innovación La ciencia de la creación de lo artificial*, vol. 2, pp. 115-139.
- [8] Erdmenger, Ch. “*Instruments de Gestió Ambiental: una guia per a les autoritats locals*”, ICLEI, Alemania, 1998.
- [9] FUSIÓN, “El hombre y el fuego”, *Revista electrónica mensual FUSION*, 156, 2006, <http://www.revistafusion.com/2006/septiembre/editor156.htm>, consultada en abril 2008.
- [10] Asimov I., “*Chronology of Science and Discovery*”, HarperCollins Publishers, 1989.
- [11] 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.
- [12] Inzunza, J. 2002, 2002-last update, *Texto virtual de Introducción a la Mecánica. Capítulo 15 Segunda ley de la termodinámica y entropía*. [Homepage of Universidad de Concepción], [Online]. Available: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap15.pdf> [2008, 15/01].
- [13] Feidt M., “*Thermodynamique et optimisation des systèmes et procédés*”, Technique et documentation, France, 1996.
- [14] Wall, G. 2002, "Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society", *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 9-12, pp. 1235-1248.



- [15] UNE-ISO 14044 “Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principio y marco de referencia”, 2006.
- [16] 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.
- [17] Steen B., “Abiotic Resource Depletion Different perceptions of the problem with mineral deposits”, *Int J LCA*, 11 vol especial1, 2006, pp. 49 – 54.
- [18] 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.
- [19] Guinée J.B. “*Handbook of Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Gazulla C, Fullana P. Herramientas de análisis ambiental para el ecodiseño. 2004; Disponible en: <http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=ES&navID=ecoDesignProcedure&subNavID=3&pagID=5> Consultado el: 04/05, 2008.
- [25] Wagner HJ., Pick E., “Energy yield ratio and cumulative energy demand for wind energy converters”, *Energy*, 29, 2004, pp. 2289–2295.
- [26] Gürzenich D., Wagner H.-J., “Cumulative energy demand and cumulative emissions of photovoltaics production in Europe”, *Energy*, 29, 2004, pp. 2297–2303.
- [27] 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.
- [28] Bösch M.E., Hellweg S., Huijbregts M.A.J., Frischknecht R., Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to theecoinvent Database, *Int J LCA*, 12, 3, 2007, pp. 181–190
- [29] 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 Consejo 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.