

UN INSTRUMENTO PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTOS Y TECNOLOGÍAS. EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

I - CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS, USOS Y LIMITACIONES.

Alejandro Pablo Arena
Becario postdoctoral CONICET.
Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda. INCIHUSA. Cricyt (CONICET)
Av. Ruiz Leal s/n. Parque Gral. San Martín. 5500 Mendoza. Tel 0261 4287370. Fax: 0261 4287370.
E-mail: aparena@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN

La necesidad de contar con información fehaciente y confiable ha determinado la estructuración y estandarización de las metodologías de análisis, conduciendo a las modernas metodologías que se basan en el Ciclo de Vida completo de productos, entre los cuales se encuentra el Life Cycle Analysis (o Assessment). El método del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es quizás el más difundido para llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental de productos, sistemas o servicios, y permite realizar comparaciones objetivas considerando todas las fases que un sistema sigue durante su vida útil: construcción, uso y desmantelamiento final. En este trabajo se presentan algunas consideraciones metodológicas del ACV, así como algunas reflexiones concernientes a sus usos y limitaciones.

INTRODUCCION

Esta metodología nació en la década del sesenta, cuando fue evidente que el único modo eficaz de analizar los sistemas industriales era el de examinar todos los procesos seguidos por la materia prima, desde su extracción, siguiendo con los procesos de transformación y terminando con el retorno a la ecosfera en forma de residuos. La importancia de este modo de analizar surgió al comprender que un determinado proceso industrial podía parecer más limpio que otro simplemente transfiriendo la contaminación a otra región geográfica, sin un mejoramiento global. En la actualidad, la noción de ACV ha sido aceptada en forma general en la comunidad científica como la única base legítima sobre la cual comparar materiales, componentes y servicios alternativos. La normativa internacional está trabajando activamente para lograr la estandarización de la metodología, lo que va a facilitar el intercambio entre grupos y países, a través de las normas ISO 14040. En la Argentina, el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM) está colaborando con la elaboración de estas normas, participando en las actividades del Comité Técnico 207 de ISO, en el Sub-Comité 5. Se puede desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida para un proceso, un servicio o una actividad, considerando todas las etapas que constituyen su vida útil. La definición de ACV dada por SETAC (1993) es la siguiente:

Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final.

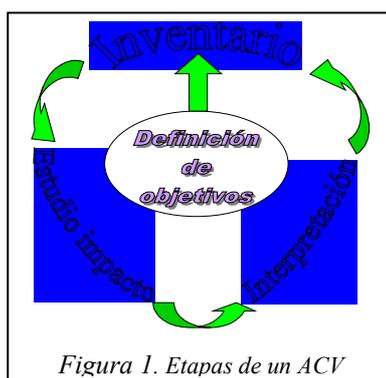


Figura 1. Etapas de un ACV

El método tiene cuatro partes fundamentales, que son:

1. la definición de objetivos, donde se establecen la finalidad del estudio, los límites del sistema, los datos necesarios, etc.;
2. el inventario, donde se cuantifican todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante todo su vida útil, los cuales son extraídos del ambiente natural o bien emitidos en él, calculando los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de sus componentes, así como las emisiones producidas (Life Cycle Inventory - LCI).
3. la evaluación de impactos, donde se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, relacionando sus resultados con efectos ambientales observables (Life Cycle Impact Assessment- LCIA).
4. La interpretación, donde los resultados de las fases precedentes son evaluados juntos, en un modo congruente con los objetivos definidos para el estudio, de modo de establecer las conclusiones y recomendaciones.

Dependiendo de los objetivos del estudio, en función de las conclusiones y recomendaciones se puede seguir con una etapa de mejoramiento, un análisis que conduce a la elaboración de propuestas de optimización del sistema estudiado para reducir los impactos calculados. Esta etapa debe ser conducida en modo iterativo, de manera de no introducir variantes que puedan empeorar la situación. Los flujos de materia y de energía consumidos y emitidos en los distintos momentos de la vida útil del sistema considerado intervienen durante:

- la fabricación, remontando el análisis desde la toma de materia prima del ambiente, el transporte, el montaje;
- la utilización y el mantenimiento;
- el desmantelamiento y el tratamiento de los residuos al final de la vida útil, lo que puede incluir el reciclaje de los materiales, su uso en otros procesos industriales, el aprovechamiento energético de los materiales, etc.

El método del ACV es de carácter dinámico, y las cuatro etapas en las que se realiza están relacionadas entre ellas, como se esquematiza en la Figura 1, por lo que a medida que se obtienen resultados se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites del sistema o los objetivos, lo que exige el recálculo. Este hecho, más la gran cantidad de datos históricos que se deben poseer para realizar un ACV, muestra la necesidad de contar con un instrumento informático para afrontar un ACV. Existen en el mercado diversos productos software para elaborar el análisis de ciclo de vida de un producto, tales como el SimaPro, The Boustead Model, Gabi-Basis, PIA, EcoPro, etc. Todos estos programas poseen un banco de datos incorporado accesible en mayor o menor medida para el usuario.

LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA

En este paso se definen los flujos entrantes y salientes que se incluirán en el análisis. En términos generales, por sistema industrial se entiende un conjunto de procesos orientados a la producción de un bien útil, y “ambiente” es todo lo demás. Ambos están separados por los límites del sistema, y conectados a través de los flujos entrantes y salientes del sistema. Los límites del sistema serán elegidos en función de los resultados que se quieren obtener, y de los datos disponibles.

EL INVENTARIO (ISO 14041). LIFE CYCLE INVENTORY - LCI

En esta fase, está especificada en la norma ISO 14041, se calculan los requerimientos energéticos y materiales del sistema la eficiencia energética de los distintos componentes del sistema, y se identifican y cuantifican los flujos salientes (gaseosos, líquidos o sólidos) del sistema. Los flujos a incluir en el inventario deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los flujos de entrada al sistema deben ser considerados en la forma en la que se encuentran en el ambiente natural, sin previa modificación humana;
- Los flujos de salida serán aquellos que irán a formar parte del ambiente exterior al sistema considerado, sin sufrir transformaciones posteriores por parte del hombre.

Para identificar estos flujos es necesario identificar cuál es el o los servicios que el sistema produce (función), cuál de ello constituye el objeto de análisis (función relevante), y qué unidad se utilizará para caracterizarla (unidad funcional).

La definición de la unidad funcional está estrechamente relacionada con el objetivo del estudio. Si este es la comparación de productos, es necesario cerciorarse que la comparación se basa en la misma unidad funcional y en consideraciones metodológicas equivalentes, como los límites del sistema, la calidad de los datos, los procedimientos de asignación, etc.

Con respecto a los flujos de energía que intervienen en el análisis, es necesario considerar los distintos tipos de fuentes de energía, que pueden ser energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica), energías (casi) renovables (geotérmico, nuclear) y energías no renovables (fósiles). También se distingue entre:

- contenido de energía (energy investment): la que ha sido consumida para construir el sistema.
- energía directa: la energía consumida por el sistema (delivered energy o energy content of fuel);
- energía indirecta: la necesaria para producir y transportar la energía y los materiales utilizados en el proceso;
- energía de la materia prima, no usada con fines energéticos (Feedstock energy).

En muchos sistemas industriales el contenido de energía no supera el 5 % del total de la energía consumida (Boustead et al 1979), y puede ser ignorada. El óptimo energético será alcanzado cuando la suma de estas voces sea mínima.

Un tratamiento aparte merece la energía aportada por el hombre en los procesos estudiados. Sobre este tema no existe un acuerdo que permita su inclusión en los cálculos, y por lo general se desprecia. Esto se justifica en casi todos los sistemas industriales, ya que el aporte energético humano al total de las energías consumidas es muy pequeño. Para cada entrada o salida, es necesario calificar el dato conseguido, considerando si se trata de un promedio temporal, el modo como se ha recogido el dato (medición, consumo acumulado, estimado, etc.), métodos de medición y de cálculo utilizados, etc. También es necesario indicar si es posible la información estadística como el desvío estándar, tipo de distribución, etc.

El transporte se debe reportar en lo posible como un proceso unitario separado. El sistema de transporte utilizado se caracteriza por sus tres componentes: la infraestructura fija (rutas, líneas, conductos, puertos, estaciones, aeropuertos), el transportador móvil (camiones, contenedores, aviones) y la fuente de energía (diesel, eléctrico). Para cada tipo de transporte se debe indicar el tipo de energía consumida por unidad de distancia (MJ/km) y por unidad de rendimiento de transporte (MJ/ton.km), las emisiones ambientales por unidad de distancia y de rendimiento de transporte, y los porcentajes promedio de carga incluyendo los viajes de vuelta vacíos.

Con los datos recolectados se prepara una estimación inicial de los flujos de materia y de energía. Mediante la aplicación de reglas de decisión se elige concentran los esfuerzos hacia aquellas áreas que pueden mejorar la calidad del inventario. Las reglas de decisión más empleadas adoptan como base la masa, la energía o la importancia ambiental, pudiendo excluir todos los flujos en los que la base elegida sea inferior a un cierto porcentaje del total. La norma ISO aconseja aplicar reglas de decisión que contemplen la contribución acumulada al sistema estudiado, en lugar de la de los materiales individuales.

CONFIABILIDAD DE LOS DATOS

Los datos sobre coeficientes de consumo de energía de distintos materiales, o de emisiones producidas, son muy útiles durante el inventario. Sin embargo, comparando las distintas recopilaciones disponibles se encuentran grandes variaciones, las cuales se deben fundamentalmente a la tecnología utilizada, el país en el que se produce, las fuentes energéticas adoptadas, la materia prima de distinto origen utilizada, y/o la gestión de los residuos de los procesos productivos (reciclado). Estos factores influyen efectivamente sobre la cantidad de energía consumida en los sistemas, y sobre las emisiones liberadas en la atmósfera. Existen otras causas que no están asociadas a los sistemas productivos, como puede ser la metodología utilizada para calcular y asignar los consumos energéticos a los distintos productos de un sistema, o los límites utilizados para definir el sistema productivo analizado. Es por lo tanto importante utilizar métodos de cálculo bien codificados y establecidos para establecer comparaciones objetivas entre distintos productos o sistemas, así como establecer métodos de comunicación de resultados que especifiquen la información precedente.

RESULTADOS Y LIMITACIONES DEL INVENTARIO LCI

La etapa del inventario no caracteriza los impactos ambientales potenciales, sino que comunica solamente entradas y salidas, los que pueden llegar a ser hasta 200 parámetros distintos. En general los resultados se agrupan en distintas categorías, como pueden ser combustibles, consumo de materia prima, feedstocks, residuos sólidos, emisiones gaseosas y emisiones líquidas.

Estas categorías pueden a su vez subdividirse en subcategorías. La interpretación directa de los resultados del inventario puede conducir a interpretaciones directas. Por ejemplo grandes volúmenes de emisiones pueden parecer más dañinos que volúmenes bajos, sin considerara su toxicidad. Por lo tanto se debe tener precaución cuando se interpretan los resultados del inventario sin pasar por una etapa de evaluación de los impactos. Por otro lado, durante el inventario se pueden agregar emisiones que ocurren en distintas operaciones, lugares geográficos y tiempos, o aún emisiones de distintos tipos, lo que puede producir una pérdida de transparencia en los resultados obtenidos.

LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO (ISO 14042)– LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT – LCIA.

El resultado que se obtiene de la etapa del inventario consiste en una gran cantidad de datos con los cuales es muy difícil hacer una evaluación ambiental de un producto o sistema. En ciertos casos es posible comparar dos opciones distintas de proyecto, o dos componentes, utilizando solamente el resultado del inventario pero esto es fácil de hacer sólo si todos los resultados obtenidos para una de las opciones resultan mejores que los de su alternativa, cosa que en la realidad rara vez ocurre. Por este motivo se utilizan parámetros ambientales que permiten realizar comparaciones sobre una base objetiva y científica, que han sido definidos y utilizados desde hace tiempo. Esto constituye la fase de evaluación de impactos, que caracteriza cuantitativa y/o cualitativamente y estima los efectos de los resultados obtenidos en el inventario.

Esta fase consta de los siguientes puntos obligatorios según la ISO 14042:

- definición de categorías: identificación de categorías de impacto, de indicadores y de aspectos del ambiente natural o humano que son afectados;
- clasificación: asignación de los resultados del inventario a las categorías de impacto identificadas;
- caracterización: cálculo de los resultados de los indicadores de categorías;

Existen además otros elementos opcionales que pueden utilizarse dependiendo del objetivo del estudio:

- normalización: cálculo de magnitudes de los indicadores relativos a valores de referencia;
- agrupamiento: ordenamiento y ranking de los indicadores;
- ponderación: conversión y agregación de indicadores entre categorías de impacto;
- análisis de calidad de los datos: estimación de la confiabilidad de los resultados de esta fase.

Los datos del inventario se recogen y clasifican en categorías de impacto, las que se definen en función de los efectos sobre la salud, sobre el ambiente y de la escala en la que actúan (global, regional y local).

DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CATEGORÍAS

Consiste en definir las categorías de impacto que se considerarán en el estudio, y en clasificar los impactos producidos por las distintas sustancias, definiendo equivalencias entre las distintas sustancias que concurren a un efecto particular a través factores de clasificación. Existen numerosas categorías de impacto que han sido propuestas para el ACV, y su inclusión está condicionada por las decisiones tomadas en las primeras fases del estudio (definición de objetivos).

Para realizar la selección de las categorías de impacto se deben tener en cuenta algunas consideraciones, como son la Integridad de los problemas ambientales abarcados, el número de categorías razonable a los fines prácticos, la independencia mutua de las categorías seleccionadas y la relación con los métodos de caracterización disponibles (Lindfors et al 1995). Una lista de posibles categorías de impacto es la siguiente:

- 1) Consumo de recursos: medido a través de relaciones del tipo Reserva/Consumo.
- 2) Potencial de calentamiento global: expresado en kg equivalentes de CO₂.
- 3) Potencial de destrucción del ozono: medido en cantidades equivalentes de CFC-11.
- 4) Toxicidad: se diferencia entre los impactos ecotoxicológicos (o permanentes) e impactos toxicológicos humanos. Existen distintos métodos para estimar este impacto, y hasta el momento no existe acuerdo sobre el más adecuado.
- 5) Potencial de Creación de Ozono fotoquímico, expresados como equivalentes de etileno (C₂H₄).
- 6) Potencial de acidificación estimado por equivalentes ácidos, o bien como equivalentes de SO₂.
- 7) Potencial de eutrofización: medido como equivalentes de O₂⁻, o bien de PO₄³⁻.
- 8) ambiente de trabajo: abarca los mismos efectos mencionados en el impacto toxicológico humano, pero incluye efectos no químicos (ruido, calor, condiciones rutinarias, etc.)

Finalizada esta clasificación no se pueden expresar juicios de valor ambiental, pero se pueden comparar los perfiles de tecnologías en competencia, e individualizar aquella más benigna del punto de vista energético o ambiental.

NORMALIZACIÓN DE LOS IMPACTOS

Finalizada la fase precedente, es necesario normalizar los resultados para expresarlos en unidades de medida comparables, apto para establecer para cada proceso estudiado un perfil sintético. Esta fase se encuentra por ahora en fase experimental, y los parámetros de normalización existentes son varios, como el de la “incidencia ambiental” del *Centre of Environmental Science* (CML), el de la “persona-equivalente” de la Universidad de Copenhague, el de los valores críticos “Swiss Critical Volume Approach”, métodos de base económica como el Environmental Priority Strategies (EPS), desarrollado por el Swedish Environmental Research Institute, etc.

Una vez que los impactos han sido normalizados se obtiene el perfil ambiental del proceso productivo, o por ejemplo del producto edilicio.

EVALUACIÓN.

En esta fase los distintos perfiles ambientales se comparan entre sí. Puede resultar que en la comparación entre dos sistemas uno contribuya mayormente al efecto invernadero, mientras el otro cree mayores riesgos para la salud humana. Resulta necesario por lo tanto establecer prioridades entre las categorías de impacto, lo que está relacionado con los valores sociales y con las preferencias.

Debido a la inevitable subjetividad que poseen ciertas decisiones que se toman durante la realización de un ACV, sobre todo en la fase del inventario, y a la incertidumbre sobre la calidad de los datos utilizados, en general es requerido realizar un análisis de sensibilidad para estimar la influencia de esos datos o decisiones sobre los resultados obtenidos.

CONSIDERACIONES FINALES. LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS LCIA

Los aspectos ambientales que son analizados y reportados en esta fase corresponden solamente a aquellos que han sido identificados en los objetivos del estudio, y no constituyen un reporte completo desde el punto de vista ambiental.

Además, la confección de listas de indicadores de categoría puede sugerir a los usuarios de los resultados que todas las categorías son de importancia equivalente desde una perspectiva ambiental, y que aquella categoría que presenta el mayor valor es la de mayor importancia, o bien que un valor pequeño puede ser insignificante.

LA INTERPRETACIÓN- ISO 14043.

En esta fase los hallazgos realizados en las dos fases precedentes se combinan para establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio, en modo coherente con los objetivos del estudio establecidos al inicio. Si no se ha efectuado la etapa de evaluación de impactos, la interpretación se basa sólo en los resultados del inventario.

Las etapas de esta fase son las siguientes:

1. identificación de aspectos significativos basados en los resultados de las etapas precedentes. Los aspectos relevantes pueden provenir de la fase de inventario (uso de energía, emisiones, residuos, etc.), de la evaluación de impactos (uso de recursos, GWP, etc.) o bien otros que indiquen contribuciones importantes a esas dos fases, como por ejemplo el transporte, la producción de energía, etc. Se puede distinguir entre etapas del ciclo de vida (producción de materiales, fabricación, reciclado, etc.), entre grupos de procesos, (transporte, generación de energía), entre procesos que pertenecen a esferas de influencia distinta (por ejemplo del proceso o dependientes de factores externos), etc.
2. evaluación, que incluye pruebas de la integridad del estudio, la sensibilidad y la consistencia. El estudio de integridad tiene como objetivo asegurar que la información relevante para la interpretación está disponible y es completa. El estudio de sensibilidad estima la confiabilidad de los resultados, analizando si la incertidumbre de los aspectos relevantes altera las conclusiones. El estudio de consistencia determina si las hipótesis, los métodos y los datos utilizados son consistentes con los objetivos del estudio, incluyendo consistencia de la calidad de los datos durante las distintas fases del ciclo de vida, diferencias regionales y/o temporales en los datos utilizados, consistencia en la aplicación de reglas de asignación y límites del sistema, etc.
3. Conclusiones. En este punto se extraen las conclusiones en modo iterativo identificando aspectos relevantes y se hacen las recomendaciones correspondientes al estudio realizado.

CONCLUSIONES. RECOMENDACIONES PARA EL USO DEL ACV. LIMITACIONES

El ACV ha tenido en los últimos años un notable incremento en difusión y aplicación, no sólo en el ámbito científico sino también en áreas gubernamentales, normativa e industriales. EN la actualidad prácticamente todos los proyectos de investigación y de desarrollo tecnológico presentados a nivel europeo contienen partes dedicadas a la aplicación del ACV del sistema productivo analizado (Badino et al 1996). A nivel industrial, el ACV se aplica para analizar las características de sus procesos productivos, con el objetivo de adecuarlos a la normativa vigente. El crecimiento desmedido a conducido a veces a un uso indebido, o a atribuirle al método más potencialidades que las que realmente posee.

Los resultados de un ACV no deben interpretarse como una descripción completa del impacto ambiental del sistema analizado. En realidad, es una figura que representa aquellos datos que están disponibles, por lo que pueden cambiar en el tiempo al cambiar los datos o las prioridades ambientales. No mucho tiempo atrás nadie pensaba en las emisiones de CO₂, y no hubiera sido incluido en un análisis ambiental, mientras hoy esto es imprescindible por la urgencia planteada por el cambio climático global. Por otro lado, el análisis responde a los objetivos fijados en la primera fase del ACV, y al cambiar estos cambiarán los resultados obtenidos. Se ha discutido cómo sea necesario la agregación de los datos del inventario, para permitir la comparación de distintos productos o sistemas. Pero esto a su vez conduce a una pérdida de información. Por ejemplo un producto que resulta de la interacción de distintos sistemas industriales repartidos en el mundo puede tener la misma emisión de un determinado compuesto nocivo que otro sistema que emite la misma cantidad en un único lugar. Toxicológicamente estos dos productos no tienen las mismas consecuencias, mientras que para un impacto global pueden ser equivalentes. Por otro lado, se asume que existe una relación lineal entre flujos salientes e impacto ambiental. Esto no es así por ejemplo cuando existen funciones de reuso o reciclado al final de la vida útil de productos o materiales. Dado que la fracción que se recupera debe ser transportada, tiene asociada un consumo energético y un impacto ambiental. Pero estos consumos y emisiones no son lineales con las cantidades recuperadas, sino con las distancias recorridas, y es conocido que no hay relación directa entre estas dos magnitudes.

En el sector industrial es frecuente la realización de la primera fase del ACV, el inventario, para luego pasar inmediatamente al mejoramiento. Esto tiene como motivaciones no sólo cuestiones económicas, sino también la falta de metodologías aceptadas universalmente para la etapa de evaluación, y puede conducir muchas veces a inmediatas mejoras en la performance ambiental del proceso. En realidad, en la mayor parte de los procesos industriales, muy complejos en sus relaciones entre flujos y procesos, es necesario modelar las mejoras que se piensa aplicables antes de llevarlas a la práctica, para no encontrar luego de grandes inversiones resultados insignificantes, o incluso contrarios a los buscados.

BIBLIOGRAFÍA

- Boustead, J., Hancock, (1979). *Handbook of industrial energy analysis*. Ellis Horwood Limited, Chichester
- Dessy P., Morfini L., Nironi L. (1996), *Dalla fabbrica alla discarica*, revista Modulo, n. 223, pp. 606-610, julio-agosto
- ISO (1997) - *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework* - EN ISO 14040.
- Jensen, A., Elkington, J., Christiansen, K., Hoffmann, L., Moller, B., Schmidt, A., van Dijk, F. (1997). *Life cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources. Final Report*. Reoprt to the European Environment Agency, Copenhagen. Dk-TEKNIK Energy & Environment.
- Badino, V., Baldo, G.L. (1996). *Con metodo, dalla culla alla tomba*. Impresa ambiente 6/96.