

# Aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida medioambiental en la comparación de tecnologías para el pulido de reflectores.

Beatriz A. González Torre<sup>1</sup>, Lucía Muñoz Ramos<sup>2</sup>, Adenso Díaz Fernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Profesora asociada (ETSIIG Gijón. Campus de Viesques. 33204- Gijón, beatrizgt@etsiig.uniovi.es)

<sup>2</sup> Ingeniera Industrial (ETSII Gijón. IUTA. Campus de Viesques. 33204 Gijón, uov00444@correo.uniovi.es)

<sup>3</sup> Profesor Titular (ETSII Gijón. Campus de Viesques. 33204 Gijón, adenso@etsiig.uniovi.es)

## RESUMEN

*El Análisis del Ciclo de Vida es una herramienta efectiva para la determinación del efecto global de un producto sobre su entorno. Constituye un importante instrumento de apoyo a la toma de decisiones en materia de gestión medioambiental, pues aplicando una visión global, detecta la etapa del ciclo del producto donde se manifiestan las mayores deficiencias. Sin embargo, la metodología puede resultar lenta y costosa si se aplica con total rigurosidad, por lo que se hace interesante el desarrollo de métodos simplificados que satisfagan mejor las necesidades de las PYMES. En este trabajo se expone, a través del caso particular de una empresa dedicada a la fabricación y diseño de sistemas de iluminación, un modelo simplificado de Análisis del Ciclo de Vida que utiliza las posibilidades de la inferencia borrosa para eludir la necesidad de realizar complejas mediciones para obtener datos concretos y cuantitativos. De este modo, la realización del ACV se convierte en más accesible para las PYMES.*

## 1 Introducción

El problema medioambiental ha sido uno de los más discutidos durante la segunda mitad de siglo. Tanto desde el ámbito de la investigación como desde las esferas políticas y empresariales se han analizado exhaustivamente las consecuencias del desarrollo tecnológico en el ciclo natural de la tierra. Se ha observado que los productos y servicios generados por la sociedad son mayoritariamente ineficientes [1]. Del mismo modo, muchos productos que por su nuevo diseño pueden contribuir notablemente a la disminución de materia y energía durante la etapa de fabricación, conllevan problemas medioambientales de distinta naturaleza, durante el uso o en la fase de deshecho y recuperación. Al juzgar el impacto medioambiental de productos o procesos ha de prevalecer la consideración del efecto global sobre el entorno frente a la búsqueda de soluciones a problemas específicos [2]. Es frecuente encontrar respuestas parciales que lo único que consiguen es trasladar el problema en el tiempo o en el espacio, dificultando en muchas ocasiones su erradicación.

De todo ello, se deduce la urgente necesidad de buscar herramientas efectivas para evaluar los impactos medioambientales asociados a un producto o servicio de manera global, considerando todos los efectos que puedan generarse desde la obtención de elementos primarios en la naturaleza para la consecución de materias primas hasta las etapas de fabricación y posterior utilización y reciclaje. El Análisis de Ciclo de Vida (más conocido por sus iniciales ACV o LCA en inglés) se está convirtiendo en una metodología sistemática altamente eficaz para la consecución de estos objetivos [3].

En este trabajo se propone una metodología para llevar a cabo el ACV en las PYMES aprovechando la inferencia borrosa para evitar la necesidad de recoger experimentalmente

datos cuantitativos, proceso que en la mayoría de las empresas pequeñas resulta demasiado costoso.

Se comenzará por exponer de qué fases consta y en qué consiste la metodología ACV, señalando los principales problemas que encuentran en su aplicación las PYMES. Después, se describirá propiamente el modelo de análisis de ciclo de vida simplificado, que como se ha comentado, se basa en la construcción de un sistema borroso que vincule un espacio de entrada, constituido por datos sencillos y cuantitativos disponibles en la PYME, con un espacio de salida formado por los impactos ambientales que se pretenden estudiar. Finalmente, se indica la forma de aplicar la metodología propuesta para evaluar la mejora medioambiental conseguida por una empresa de iluminación al modificar la tecnología para el pulido de reflectores.

## 2. Descripción general de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida

La metodología ACV consiste, en líneas generales, en la realización de una serie de balances de energía y materia para evaluar el consumo de recursos y la generación de residuos asociados a los procesos que se llevan a cabo a lo largo de la vida del producto o servicio. Dicha metodología, tal como la contempla el comité ISO/TC 207 consta de cuatro etapas fundamentales (figura 1).

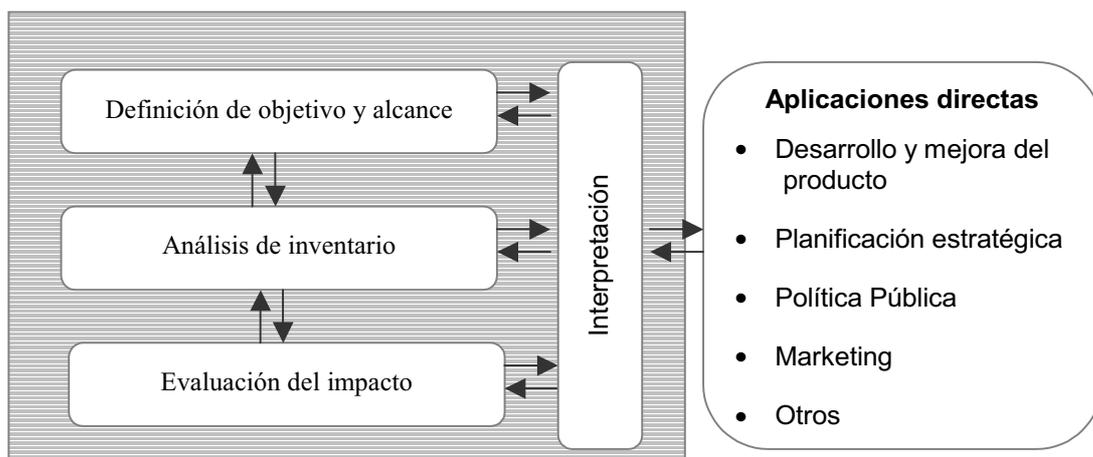


Figura 1. Fases en la realización de un análisis del ciclo de vida

Fuente: ISO 14040

En la **definición de objetivos** se concretan las razones para llevar a cabo el estudio y la información que se espera obtener a través de él. Como en cualquier estudio de ACV puede profundizarse a diferentes niveles, es muy importante prefijar de antemano el **alcance** del trabajo que se pretende realizar. Para ello, será preciso definir las funciones del sistema que se contemplarán, la unidad funcional a la que se referirán todas las medidas, el diagrama de proceso, los límites en el propio sistema y en la asignación de cargas ambientales, así como otros criterios de interés como pueden ser la calidad exigida a los datos empleados o el tipo de revisión crítica que se considera conveniente realizar.

La fase de **análisis de inventario** es, en esencia, un balance de materia y energía del sistema. En ella, se recogen los datos y se efectúan los cálculos necesarios necesarios para la valoración de las entradas y salidas del sistema.

Una vez recogidos los datos, hay que convertir las entradas y salidas del sistema, aplicando algún modelo, en impactos ambientales. Esta fase se conoce de manera global como fase de **evaluación de impactos** y puede descomponerse en categorización (o identificación de las categorías de impacto a estudiar), clasificación (o asignación de los datos del inventario a las distintas categorías de impacto) y caracterización (o evaluación final de los niveles de impacto). Los modelos más extendidos hasta el momento, se basan en la ponderación, agregación y normalización de ciertos indicadores ambientales, constituidos a partir de datos cuantitativos que exigen la realización de mediciones a lo largo del ciclo de vida o la estimación de valores concretos a partir de consultas en bases de datos específicas.

No interesa simplemente la obtención de resultados, sino que los valores obtenidos deben ser finalmente **interpretados** de manera acorde a los objetivos y al alcance inicialmente planteados. En algunos casos, es preciso llevar a cabo una revisión crítica, a través de la cual un panel de expertos juzga si el análisis ha sido objetivamente realizado y posee la consistencia, fiabilidad y validez requeridas.

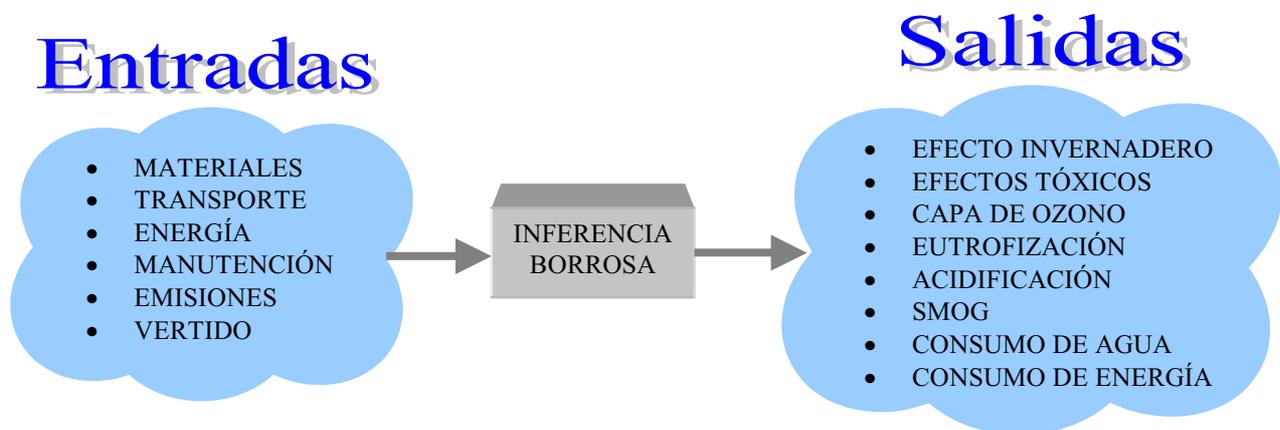


Figura 2: Modelo de análisis de ciclo de vida simplificado adaptado a PYMES

La realización de un ACV completo es, sin duda, un proceso lento y costoso, que requiere un conocimiento profundo tanto de la problemática medioambiental como del ciclo de vida particular de cada producto. Esto dificulta la extensión de su uso a las empresas como herramienta de mejora medioambiental, especialmente a aquellas organizaciones que por su menor capacidad económica y financiera no pueden destinar recursos específicos a estos temas. Para solventar este problema, se han propuesto múltiples opciones de simplificación del análisis del ciclo de vida [4, 5], la mayoría consistentes en reducir el número de fases o impactos estudiados. El European Working Group de SETAC ha estudiado en qué medida los resultados obtenidos a través de métodos simplificados difieren de los propios de un ACV completo, llegando a la conclusión de que si los objetivos del estudio no son extremadamente rigurosos, la simplificación es válida y resulta muy positiva en términos de tiempo y recursos [6]

En este trabajo, se propone la simplificación del ACV en la fase de evaluación, aplicando la inferencia borrosa para traducir directamente las ideas simples (aportadas por los realizadores del estudio) en niveles de impactos ambientales, a través de un sistema fuzzy construido sobre la base de los criterios proporcionados por un panel de expertos. Como en todo sistema fuzzy, se parte de la elección de las variables de entrada y de salida (figura 2) para posteriormente definir las funciones de pertenencia asociadas a las categorías de cada variable y, finalmente,

se establecen las reglas lógicas que vinculan los niveles alcanzados en las variables de entrada con los correspondientes a las variables de salida.

Una ventaja adicional del modelo propuesto es que trata de hacer más sencillos los procesos de definición de objetivos y alcance y análisis del inventario, pues a través de un cuestionario de preguntas sencillas y concretas, se va guiando a la persona encargada de realizar el estudio en la toma de decisiones en relación con las fases de definición de alcance y objetivos.

De este modo, se construye un modelo de análisis de ciclo de vida de fácil aplicación y por tanto, al alcance de todo tipo de empresas, incluidas las PYMES, que además respeta fielmente las indicaciones de la norma ISO 150041 de simplificación del análisis del ciclo de vida, en la que se postula que no se pueden resumir en modo alguno las etapas de definición de objetivos y alcance, ni la de interpretación de los resultados.

### **3. Modelo de análisis de ciclo de vida simplificado basado en la lógica borrosa**

Como se expuso en el apartado anterior, uno de los mayores inhibidores a la hora de aplicar el ACV en las PYMES es la falta de datos exactos y la inadaptación de los incluidos en las bases de datos comerciales a las particularidades geográficas y temporales de cada empresa. Este problema se reduce notablemente a través del modelo propuesto, que al aplicar la lógica difusa reduce en gran medida la necesidad de disponer de datos concretos y cuantitativos.

En primer lugar, se eligen las variables de entrada y salida que se precisan en el modelo. Las variables de entrada recogerán los datos disponibles en la PYME, mientras que las de salida vendrán determinadas por los niveles de impacto ambiental que se pretenden estudiar. A continuación, habrá que definir las funciones de pertenencia borrosa para cada nivel de cada variable y, finalmente, relacionar las variables de entrada con las de salida a través de reglas lógicas.

En nuestro caso, se eligieron las variables de entrada cualitativas y cuantitativas y los impactos ambientales a estudiar que se muestran en la tabla 1. Para la definición de las funciones de pertenencia a los niveles “alto”, “medio” y “bajo” de las variables cualitativas fue preciso combinar los datos cuantitativos incluidos en una base de datos comercial con las opiniones obtenidas a través de un panel de expertos constituido por químicos e ingenieros con una especial formación en el plano medioambiental.

Para la definición de las reglas de inferencia borrosa se utilizó el siguiente criterio: los antecedentes de las reglas están constituidos (tabla 1) por una variable cualitativa y al menos otra cuantitativa (ya que se plantea que el nivel de impacto ambiental viene dado por la interacción de la cantidad utilizada de una alternativa y de la potencialidad de producir un determinado efecto medioambiental asociada a esa alternativa); en los consecuentes, aparecerá en cada caso el impacto medioambiental que se pretende evaluar. El modo de relación de los niveles alcanzados en las variables cuantitativas y cualitativas es el que se muestra en la tabla 2, si bien, una vez definidas de este modo las reglas, se solicitó de nuevo al panel de expertos la revisión de las mismas y la introducción de las pertinentes modificaciones (figura 3).

FASE DEL CICLO DE VIDA		ENTRADAS		IMPACTOS AMBIENTALES ANALIZADOS					
		Variables cualitativas	Variables cuantitativas						
<b>FASE PREVIA A LA MANUFACTURA</b> Se repiten las entradas y salidas para cada componente $C_i$		Tipo de material	Cantidad (gramos)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo agua y energía				
		Transporte a la empresa	Distancia (km)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos	Metales pesados Smog				
		Tipo de material del embalaje	Peso embalaje (gramos)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo agua y energía				
<b>MANUFACTURA</b>		Para cada fase del proceso en la empresa, $F_i$		Para la fase en conjunto		Tipo de sustancias en emisiones al aire	% emisiones al aire	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog
						Tipo de sustancias en emisiones al agua	% emisiones al agua	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos	Metales pesados Acidificación Smog
		Para el producto final		Para $comp.C_i$		Sector industrial	Rendimiento material del proceso/ % de pérdidas de materia	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo agua y energía
						Tipo de energía utilizada	Rendimiento energético	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo de energía
		Para el producto final		Para $comp.C_i$		Tipo de vertido	Peso embalaje (gramos)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog
						Material del embalaje del producto	Cantidad en gramos	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo agua y energía
		Para el producto final		Para $comp.C_i$		Tipo de transporte al distribuidor	Distancia (km)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos	Metales pesados Smog
						Tipo de sustancias en emisiones al aire	Valoración de emisiones al aire (altas, medias, bajas)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog
		<b>DISTRIBUCIÓN</b>		Tipo de sustancias en emisiones al agua	Valoración de emisiones al agua (altas, medias, bajas)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos	Metales pesados Acidificación Smog		
				Tipo de energía utilizada	Cantidad consumida (alta, media, baja)	Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos Metales pesados	Eutrofización Acidificación Smog Consumo de energía		
*	Cantidad de agua consumida			Consumo de agua					
Tipo de transporte al usuario	Distancia (km)			Efecto invernadero Reducción de la capa de ozono Efectos tóxicos para los humanos	Metales pesados Smog				

Tabla 1 : Relación de entradas y salidas incluidas en el modelo

<b>USO</b>	Para el producto	Tipo de vertido	Peso producto (gramos)	Efecto invernadero	Eutrofización	
		Material principal		Reducción de la capa de ozono	Acidificación	
		*	Valoración del consumo de agua	Consumo de agua	Smog	
	*	Valoración del consumo de energía	Consumo de energía			
	Para cada elemento auxiliar A <sub>i</sub>	Material del componente auxiliar	Vida útil del producto/ vida útil elemento auxiliar	Masa de pto/ masa elto auxiliar	Efecto invernadero	Eutrofización
					Reducción de la capa de ozono	Acidificación
	Tipo de vertido	Peso producto (gramos)		Efectos tóxicos para los humanos	Smog	
	Material principal			Metales pesados		

Tabla 1 (continuación): Relación de entradas y salidas incluidas en el modelo

Tan sólo queda establecer el modo de recoger los datos en la PYME, es decir, el modo de llevar a la práctica la fase de análisis del inventario. Para ello, se diseñó un cuestionario mediante el cual el responsable de realización del análisis sabe fácilmente cuáles son los datos cualitativos y cuantitativos necesarios. En este cuestionario no sólo se aborda la fase de análisis de inventario, sino que a través de un proceso guiado se facilita a la persona en la PYME el establecimiento claro y detallado de los contenidos propios de la fase de análisis y objetivos.

Nivel variable Cuantitativa Nivel variable cualitativa	<b>BAJO</b>	<b>MEDIO</b>	<b>ALTO</b>
	<b>BAJO</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>
<b>MEDIO</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>ALTO</b>	<b>Alto</b>	<b>Alto</b>	<b>Muy alto</b>

Tabla 2: Criterio general para el establecimiento de las reglas de inferencia borrosa

Así, queda constituido el modelo de análisis de ciclo de vida simplificado, cuya fase de evaluación se basa en la aplicación de la lógica difusa para relacionar un escenario de entrada, el de la PYME, con un escenario de salida, constituido por los niveles de impacto analizados. Para evaluar el ciclo de vida de un producto no hay más que introducir los valores de entrada, obtenidos a través del cuestionario a la PYME. De este modo se activan los antecedentes de las reglas de inferencia y se deducen y agregan los niveles de impacto expresados en los consecuentes. De este modo, se obtiene una puntuación agregada para cada nivel de impacto ambiental en cada fase, con lo que resultará inmediato para el responsable medioambiental de la PYME la interpretación de resultados de manera acorde a los objetivos y al alcance planteado.

#### 4. Análisis y discusión

La principal ventaja del método expuesto radica en el ahorro de tiempo y esfuerzo en la realización del ACV al no ser precisa la introducción de medidas exactas ni la realización de complejas mediciones cuantitativas. Esto es posible debido a la forma de llevar a cabo el proceso de asignación de cargas ambientales, que, aplicando la inferencia borrosa, permite plasmar el conocimiento de un grupo de expertos en una batería de reglas lógicas. De este modo, se elude la necesidad de que el realizador del estudio posea amplios conocimientos acerca de las causas de los problemas medioambientales y se elimina la necesidad de aplicar mecanismos de ponderación y normalización para el cálculo de indicadores, aspecto sin duda más criticado en la bibliografía [ 1] de los métodos de evaluación tradicionales.

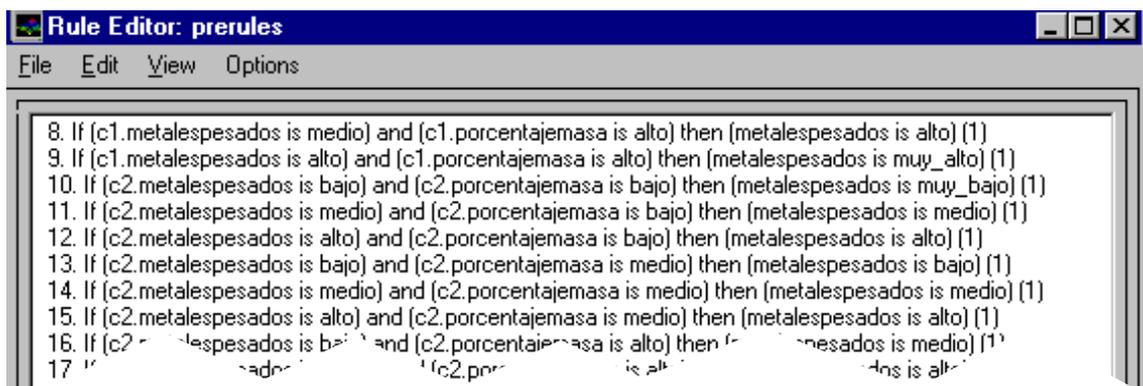


Figura 3: Ejemplo de reglas de inferencia borrosa para la fase previa a la manufactura

Por último, para validar el modelo y asegurar su sencillez y posibilidad de aplicación a las PYMES, se aplicó el mismo en un caso real, en el que se trataba de evaluar la diferencia de impactos al realizar el pulido de reflectores a través de dos diferentes tecnologías.

#### 5. Validación del modelo. Caso de aplicación.

La empresa elegida es una organización dedicada a la fabricación y diseño de sistemas de iluminación. Entre su gama de productos se encuentra la línea de los downlight y dentro de ésta el downligh económico, modelo elegido para su estudio por ser uno de los productos más vendidos en el momento actual. En el proceso de fabricación del downlight se distinguen las etapas de torneado y pulido de reflectores, corte y plegado del soporte de la brida, pintura de aros, montaje eléctrico y embalaje final de componentes. Recientemente se ha modificado el sistema para llevar a cabo el pulido de reflectores, pasándose del sistema tradicional de anodizado, que utiliza diversos baños ácidos para modificar las propiedades superficiales del aluminio, logrando así un mayor brillo, a un sistema de lacado y metalizado que consiste en revestir el aluminio con varias capas de resina epoxi que ofrecen un acabado superficial similar en términos de calidad de reflexión de la luz y brillo.

A través de la aplicación del modelo de análisis del ciclo de vida descrito se ha tratado de ver si se producía una mejora global de los impactos a lo largo del ciclo de vida al modificarse la tecnología. Se aprecia que si bien es cierto que el nuevo método permite una reducción notable de las emisiones al aire durante la etapa de fabricación, se produce paralelamente un incremento de la energía consumida a lo largo del ciclo de vida. Además, el nuevo proceso de tratamiento superficial de los reflectores reduce ligeramente su vida útil, cuestión que no es

prácticamente relevante desde el punto de vista comercial pero si desde el punto de vista medioambiental puesto que exige un incremento de la actividad extractiva.

Así, se pone en evidencia una vez más la posibilidad de aparición de efectos medioambientales contradictorios cuando se trata de resolver una problemática específica y, con ello, se ratifica la necesidad de analizar el impacto ambiental de un producto de manera global, a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida y no restringiéndose exclusivamente a la fase productiva.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se expone la posibilidad de utilizar la inferencia borrosa para llevar a cabo la fase de evaluación del análisis del ciclo de vida. A través del modelo propuesto es posible traducir los datos y opiniones inexactas que pueden ser aportados por una PYME en niveles de impacto ambiental. Para ello se cuenta con las valoraciones realizadas por un panel de expertos, que clasifican una serie de elementos comunes según su incidencia en el efecto invernadero, la reducción de la capa de ozono, la generación de metales pesados, la acidificación, la eutrofización, el smog y las emisiones al aire y al agua.

El modelo tiene la ventaja de que no precisa la introducción de factores de peso o ponderaciones subjetivas que hayan de ser realizadas por quien lleva a cabo el estudio, además de resultar de aplicación rápida y sencilla por la escasa necesidad de datos cuantitativos que precisa. Con él se pretende poner al alcance de las PYMES una herramienta efectiva para asegurar la mejora medioambiental continua y consecuentemente, la capacidad competitiva.

En concreto, se aplicó la metodología a una empresa dedicada a la fabricación y diseño de sistemas de iluminación, para valorar el efecto de modificación de su tecnología en la etapa de pulido de reflectores. Se detectó la existencia de un incremento del nivel de energía consumida a lo largo del ciclo de vida del producto que disipa en parte la mejora medioambiental conseguida a través de la reducción de los niveles de emisión al agua y al aire que se pretendían alcanzar con la automatización de la tecnología.

## 7. Referencias

- [1] Fullana, P. y Puig, R., 1997, *Análisis del Ciclo de Vida*, (Rubes: Barcelona)
- [2] Fussler, C. y James, P. 1998, *Eco- Innovación*, (Mundi-Prensa: Madrid)
- [3] International Organization for Standardisation (1997): ISO/DIS 14040 Environmental management —Life Cycle Assessment— Principles and framework
- [4] Graedel, T.E. y Allenby, B.R., 1995, *Industrial Ecology*, (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall)
- [5] Masoni, P., Scimia, E.y Balázs, S. (2000), “VerdEE- A new tool for the adoption of Life Cycle Assessment in Small and Medium-sized enterprises”, *Environmentally Conscious Manufacturing*, Surendra M. Gupta, Proceedings of SPIE, vol 4193, pp. 252-260, Boston (USA)
- [6] Todd, J.A. y Curran. M.A. (1999), “Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup”, <http://www.setac.org/lca.html>