

METODOLOGÍAS QUE PERMITEN INTEGRAR EL REQUERIMIENTO AMBIENTAL EN EL PROCESO DE DISEÑO DE PRODUCTOS: UNA REVISIÓN

María D. Bovea
Victoria Pérez-Belis

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón

Abstract

The ecodesign of products is a crucial factor in the Community strategy on Integrated Product Policy. Then, a wide range of techniques have been developed to evaluate the environmental performance of products. However, the integration of environmental aspects into the early stages of the design process and development of products together with a multi-criteria approach that makes it possible to balance the environmental requirement against other traditional requirements are two of the key aspects for successful sustainable production. This communication reviews design methodologies that have been developed to integrate environmental requirements into the design process. A classification was made according to features such as the technique utilised to assess the environmental aspect, the traditional requirements that are taken into account in addition to the environmental characteristics, the traditional design methodology used as a reference or whether these methodologies have been put to practical use.

Keywords: *environmental requirement, eco-design, design methodologies*

Resumen

El diseño ecológico de los productos constituye un elemento fundamental de la estrategia comunitaria sobre la Política de Productos Integrada. Por ello, se ha desarrollado un amplio rango de técnicas que permiten evaluar su comportamiento ambiental. Sin embargo, sólo una minoría de estas herramientas permite la integración de requerimientos ambientales en las primeras etapas del proceso de diseño y la posibilidad de que éste pueda ser evaluado conjuntamente con el resto de requerimientos que tradicionalmente se consideran durante el desarrollo del producto.

Esta comunicación revisa las metodologías de diseño que permiten integrar el aspecto ambiental en el proceso de diseño de productos, con el fin de realizar una clasificación de acuerdo a diferentes criterios: técnica aplicada para evaluar el comportamiento ambiental, requerimientos tradicionales considerados además del ambiental, metodología de diseño aplicada como referencia, casos prácticos en los que se ha aplicado, viabilidad, etc.

Palabras clave: *metodología de diseño, requerimiento ambiental, ecodiseño*

1. Introducción

La implementación de herramientas de apoyo dirigidas a aspectos medioambientales es, en mayor medida, percibida por las industrias como un modo de incrementar su eficiencia durante el proceso de desarrollo del producto (Beskow y Ritzén, 2000). Actualmente y como consecuencia de la evolución de la sociedad en lo que a valores y consideraciones ambientales se refiere, las empresas y organizaciones actuales consideran y reconocen el

concepto de sostenibilidad como una herramienta imprescindible y de gran importancia para poder sobrevivir en un mundo competitivo.

A nivel europeo, la Política de Productos Integrada (COM 68, 2001) promueve el desarrollo de un mercado de productos ecológicos. Con este fin, impulsa el empleo de instrumentos y herramientas que permitan la integración de los efectos ambientales en cada fase del ciclo de vida del producto. Para ello, resulta fundamental considerar los aspectos ambientales en el proceso de diseño y desarrollo de un producto, reduciendo o eliminando las repercusiones ambientales del mismo en el medio ambiente.

Durante el proceso de diseño y desarrollo de un producto deben considerarse un amplio rango de requerimientos, que desde diferentes perspectivas, deben englobar las necesidades del cliente, así como los intereses de la compañía y las consideraciones ambientales. Todos ellos deben permanecer equilibrados y ser considerados de forma sistemática. Según Conteras et al., (2009), a pesar de resultar complejo coordinar y equilibrar todos estos requerimientos, se ha demostrado que el hecho de integrar los aspectos ambientales en el proceso de desarrollo de un producto resulta beneficioso para los intereses de las compañías, en lo que se refiere a la mejora de su imagen, competencia en el mercado y reducción de costes.

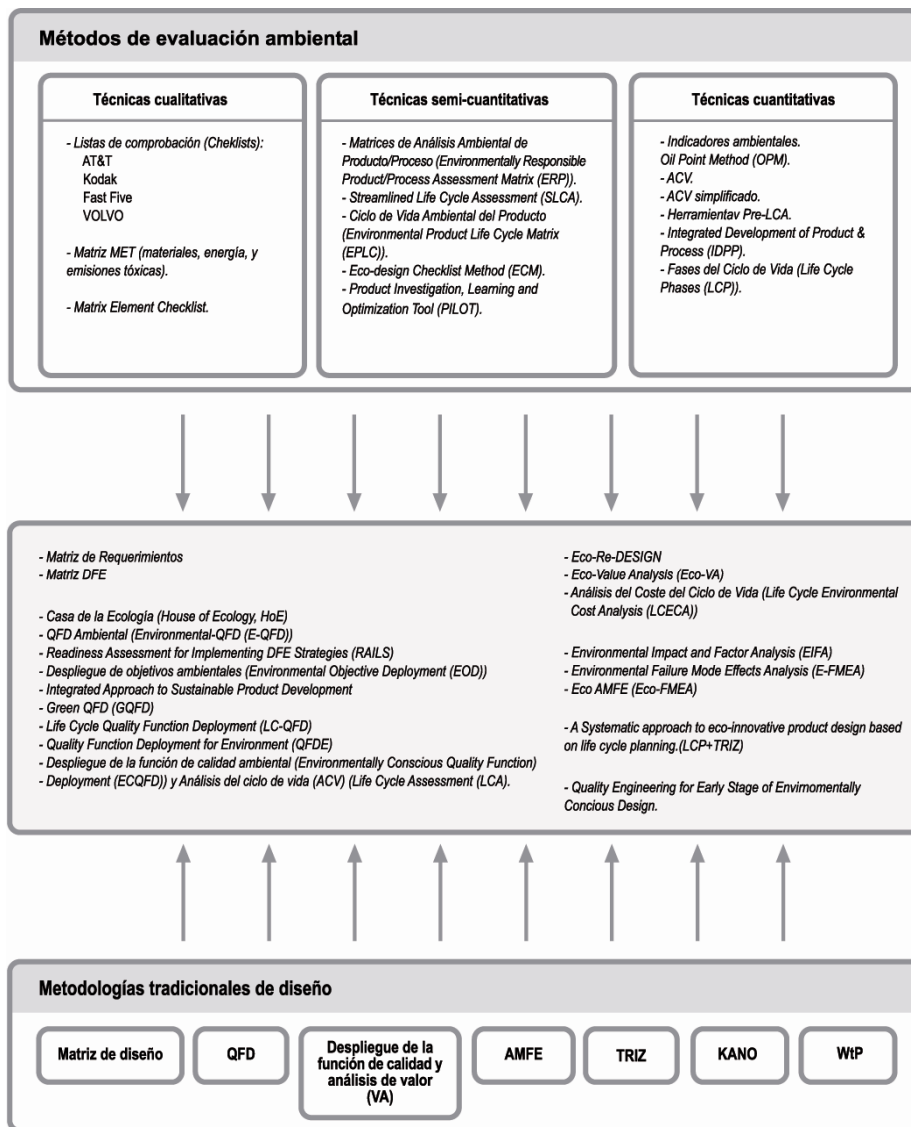
Así pues, puede decirse que el concepto de sostenibilidad aplicado al diseño de productos implica la intersección entre los factores de diseño (incluido el factor ambiental) y el proceso de diseño. El modo de integrar estos requerimientos ambientales y tradicionales en el proceso de diseño ha sido objeto de estudio en los últimos años (Brent y Labuschagne, 2004). Esto ha resultado en el desarrollo de un amplio abanico de herramientas, que van a ser revisadas y analizadas en esta comunicación.

2. Metodología

Este documento revisa diferentes metodologías que se han desarrollado con el fin de ayudar a los diseñadores a evaluar el comportamiento ambiental de los mismos y a relacionarlo con el resto de requerimientos de diseño.

Para ello, se ha seguido la metodología propuesta en la Figura 1. En primer lugar, se realiza una revisión de los métodos que analizan el aspecto ambiental de forma aislada. A continuación se realiza una revisión de metodologías que incorporan requerimientos ambientales en el proceso de desarrollo del producto, mediante la combinación de los métodos de evaluación ambiental y metodologías tradicionales de diseño, tales como Despliegue de la Función de Calidad (QFD) (Akao, 1990), Análisis de Valor (EN 12973, 2002), Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) (Stamatis, 1995), KANO (Kano, 1984) o TRIZ (Altshuller, 1988).

Figura 1. Relación entre métodos de evaluación ambiental y metodologías de diseño.



3. Métodos de evaluación del comportamiento ambiental de productos

La necesidad de medir y evaluar el impacto ambiental de los productos ha provocado el desarrollo de una gran variedad de métodos. Este rango de métodos se extiende desde las herramientas más simples, como indicadores generales centrados en problemas ambientales específicos, hasta los métodos más completos que consideran un amplio rango de categorías de impacto a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

Aunque estos métodos pueden ser clasificados en base a diferentes criterios, en esta comunicación se clasificarán en función de la forma en que se presentan los resultados de la evaluación ambiental, esto es, cualitativos, semi-cuantitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos y semi-cuantitativos son rápidos y sencillos de utilizar, y pueden ser aplicados en las fases iniciales del desarrollo de productos, aunque no son muy fiables.

Los métodos cuantitativos resultan interesantes cuando se requiere un detallado perfil ambiental del producto, sin embargo es necesario un gran número de datos sobre el producto antes de ser diseñado y tienden a ser incorporados en el proceso de diseño en etapas bastantes tardías, cuando únicamente se pueden realizar cambios menores.

La Tabla 1 muestra un resumen de las más utilizadas y comentadas en la bibliografía.

Tabla 1. Clasificación de métodos de evaluación del comportamiento ambiental de productos.

MÉTODO EVALUACIÓN AMBIENTAL		REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Técnicas Cualitativas			
Listas de comprobación Checklists	AT&T Kodak Fast Five Philips	Keoleian et al. (1995) Betz y Vogl (1996) Meinders (1997)	Preguntas relevantes sobre el producto formuladas desde la perspectiva ambiental con el objetivo de determinar sus debilidades y problemáticas.
Matriz MET Materiales, Energía, y emisiones Tóxicas MET Matrix		Brezet y van Hemel (1997)	Se consideran dos matrices: una de ellas presenta tres categorías de interés medioambiental (materiales, energía y emisiones tóxicas) asociados a cada una de las tres etapas del ciclo de vida del producto (producción, uso y eliminación). La segunda matriz se completa con el grado de interacción de los efectos (bajo, medio, alto) las etapas del ciclo de vida.
Lista de comprobación de la Matriz ERP Matrix Element Checklist for ERP		Graedel y Allenby (1996)	Lista de preguntas que se utiliza combinada con la Matriz ERP, ya que reduce el grado de subjetividad a la hora de completarla. Relaciona problemas ambientales para cada producto con las etapas de su del ciclo de vida.
Técnicas semi-cuantitativas			
Matrices de Análisis Ambiental de Producto/Proceso Environmentally Responsible Product/Process Assessment Matrix (ERP)		Graedel y Allenby (1996)	Se distinguen dos matrices: una para productos y otra para procesos. Las filas de representan las etapas del ciclo de vida y las columnas los aspectos ambientales. Cada celda en la matriz se evalúa en una escala de 0 (impacto más alto, evaluación muy negativa) a 4 (impacto más bajo, una evaluación ejemplar y óptima), en función de los impactos causados en cada una de las etapas del ciclo de vida. El sumatorio de filas o columnas representa al valor correspondiente al impacto total.
Análisis del Ciclo de Vida Simplificado Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)		Bennett y Graedel (2000).	Herramienta de identificación de puntos críticos y de oportunidades para mejorar aspectos ambientales. No es un método exhaustivo y global pero es especialmente útil en la comparación de impactos ambientales entre diferentes productos.
Ciclo de Vida Ambiental del Producto Environmental Product Life Cycle Matrix (EPLC)		Gertsakis (1997)	Similar a la Matriz ERP, analiza la interacción entre las diferentes etapas del ciclo de vida y los diferentes impactos ambientales. Se valora cualitativamente entre 4 (nivel de alto impacto al medio ambiente) y 0 (nivel de bajo impacto al medio ambiente) cada punto de la matriz, siendo el sumatorio de filas o columnas el valor correspondiente al impacto total.
Lista de comprobación de ecodiseño Eco-design Checklist Method (ECM)		Wimmer (1999)	Combina una lista de comprobación con información semi-cuantitativa. Se aplica a tres niveles diferentes: partes, producto y función. La valoración semi-cuantitativa es empleada para averiguar si cada nivel satisface los requerimientos de eco-diseño previamente establecidos (1 "Requerimientos satisfactorios" a 4 "Requerimientos no satisfactorios"). De este modo, los puntos débiles son identificados en los tres niveles y las tareas son rediseñadas con el objetivo de aumentar y mejorar el comportamiento ambiental del producto.
Herramienta para la Investigación, Aprendizaje y Optimización del Producto Product Investigation, Learning and Optimization Tool (PILOT)		Wimmer et al. (2004)	Es una actualización del método ECM, que incrementa el número de estrategias de eco-diseño. Es una herramienta on-line que permite, para las diferentes estrategias, calcular un índice de prioridad en función de dos parámetros: relevancia y cumplimiento. Para aquellas estrategias prioritarias puede establecerse ideas de mejora que se evalúan cualitativamente en función de su coste, viabilidad y realización.
Técnicas cuantitativas			
Indicadores ambientales Environmental Indicators		Navinchandra (1991)	Indicadores que permiten evaluar aspectos concretos del producto a lo largo de su ciclo de vida. Ejemplos de indicadores: reciclabilidad, biodegradabilidad, emisiones netas, contenido en sustancias peligrosas, etc.
Métodos de los puntos Oil Point Method (OPM)		Lenau y Bey (2001)	Los indicadores de este método se definen como la energía consumida o la energía contenida en el producto, utilizando como unidad de medida "Oil Point [OP]" (1 OP = 45 MJ (energía contenida en 1 kg de diésel).
Análisis del Ciclo de Vida (ACV) Life Cycle Assessment (LCA)		ISO 14040-44 (2006)	Técnica que permite evaluar las cargas ambientales asociadas al producto a lo largo de su ciclo de vida. Permite obtener indicadores ambientales para diferentes categorías de impacto o indicadores ambientales globales que agrupan todas las categorías de impacto.

3. Necesidad de metodologías de diseño que integren aspectos ambientales en el diseño de producto.

Todos los productos generan un impacto ambiental en alguna de las etapas de su ciclo de vida. Las metodologías descritas anteriormente permiten, de forma cualitativa o cuantitativa, la evaluación del comportamiento ambiental de los productos. Sin embargo, ISO Guide 64 (2008) e ISO/TR 14062 (2002) recomiendan que el impacto ambiental de los productos se considere de forma conjunta con el resto de requerimientos que se evalúan a la hora de diseñar un producto: funcionalidad seguridad, coste, calidad, ergonomía, etc.

Existen tres factores clave que optimizan el proceso eco-diseño:

- La integración de aspectos ambientales en las primeras etapas del diseño del producto, ya que esto ofrece la flexibilidad necesaria para conseguir cambios e incorporar así mejoras en el producto.

- El enfoque del ciclo de vida que considera cómo el producto puede afectar al medio ambiente en cada una de sus diferentes etapas.
- El enfoque multicriterio, que considera simultáneamente todos los requerimientos tradicionales que afectan al producto junto con los aspectos ambientales relevantes.

De este modo, se puede considerar que el objetivo de los métodos descritos anteriormente es cuantificar, medir o evaluar el impacto ambiental de los productos de forma aislada, sin considerar el resto de requerimientos del producto.

Con el fin de conseguir integrar el aspecto ambiental en el proceso de diseño, se ha desarrollado un amplio abanico de metodologías que se describen en el siguiente apartado, y que combinan la evaluación del aspecto ambiental (mediante la aplicación de algunos de los métodos descritos en la Tabla 1), con diferentes metodologías de diseño tradicionales (QFD, AMFE, Análisis de Valor, KANO, TRIZ, etc.), tal y como muestra la Figura 1.

4. Metodologías de diseño que integran aspectos ambientales

En los últimos años se han desarrollado un gran número de metodologías cuya finalidad es implementar, en una única herramienta, los tres factores clave descritos anteriormente que optimizan el proceso de eco-diseño de productos. Estas metodologías varían en cuanto a complejidad, calidad y tiempo requerido para ser aplicadas, y no existe una clara clasificación que permita seleccionar la técnica más apropiada para cada aplicación.

A continuación, se describen estas metodologías clasificadas en función de la metodología de diseño empleada como referencia.

4.1 Metodologías basadas en Matrices de Diseño

Las metodologías basadas en matrices de diseño son técnicas descriptivas que incluyen la valoración cualitativa del equipo de diseño para diferentes requerimientos (incluido el ambiental) de un producto a lo largo de su ciclo de vida. La Tabla 2 muestra las características de matrices propuestas para integrar el aspecto ambiental.

Tabla 2. Metodologías basadas en Matrices de diseño.

NOMBRE	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Matriz de Requerimientos Requirements Matrix	Keoleian et al. (1995)	Consiste en una matriz multicapa que permite el estudio de la interacción entre los diferentes requerimientos del ciclo de vida, incluyendo en una de sus capas el requerimiento ambiental. Cada matriz, para cada uno de los requerimientos, evalúa de forma cualitativa la interacción entre las etapas del ciclo de vida y el producto, proceso y distribución.
Matriz DFE DFE Matrix	Johnson y Gay (1995)	El objetivo es introducir los requerimientos ambientales, de salud y seguridad, en el proceso de diseño del producto. La matriz considera en columnas la utilización de recursos naturales (energía y materiales), la protección ambiental (residuos sólidos y emisiones/vertidos) y en filas las etapas del ciclo de vida del producto. Cada concepto de producto se analiza utilizando una escala de (-2, +2) en cada celda de la matriz. Los elementos de mayor prioridad que presentan una valoración negativa necesitan ser mejorados o equilibrados frente al resto de atributos.

Ambas matrices consideran el requerimiento ambiental junto otros requerimientos desde una perspectiva de ciclo de vida. Sin embargo, la **Matriz de Requerimientos** no consigue la integración sistemática de todos ellos, ya que se analiza de forma independiente cada requerimiento. Ambas metodologías pueden aplicarse en las primeras etapas de diseño, aunque la **Matriz DFE** está enfocada hacia la identificación de los aspectos de mejora.

4.2 Metodologías basadas en la Casa de la Calidad (QFD)

La metodología de Despliegue de la Función de Calidad (*Quality Function Deployment*, QFD) es una metodología utilizada para asegurar que la calidad requerida por el consumidor se cumple en el diseño de un producto. Su elemento básico es la Casa de la Calidad (*House of Quality*, HoQ), que permite relacionar los requerimientos del consumidor (Voz del Usuario, *Voice of Customer*, VoC) con las características de calidad del producto.

Esta metodología ha servido de base para el desarrollo de nuevos métodos de ecodiseño que incluyen en los requerimientos del consumidor, aspectos relativos al comportamiento ambiental del producto, tal y como muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Metodologías basadas en la QFD.

NOMBRE	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Casa de la Ecología House of Ecology (HoE)	Halog et al. (2001)	Es una modificación del HoQ procedente de la metodología QFD que utiliza categorías de impacto ambiental en lugar de requerimientos de calidad. Incorpora los siguientes cambios en la estructura tradicional de HoQ: 1) Los requerimientos principales son definidos como categorías de impacto y sus valores se basan en la opinión de los expertos en medioambiente; 2) las necesidades de diseño se expresan en términos de las sustancias emitidas durante el proceso y aquellas que requieren ser reducidas; 3) la relación entre los requerimientos principales y de diseño se presenta como el acuerdo por el que una determinada sustancia contribuye a generar una determinada categoría de impacto; las especificaciones principales son el resultado de una comparativa ambiental de los valores de emisión, y los costes de diseño se definen como el coste total de esta comparativa de valores; y 5) la clasificación de las sustancias emitidas se basa tanto en los costes como en las consideraciones ambientales.
QFD-Ambiental Environmental QFD (E-QFD)	Davidsson, (1998)	Combina un ACV simplificado con el QDF, con el objetivo de identificar cualidades que puedan mejorar la competitividad del producto sin desatender ninguna gran carga ambiental. Actividades: 1) obtener información sobre los impactos ambientales potenciales del producto a lo largo de su ciclo de vida, analizando el concepto de diseño o productos similares que ya existen, 2) obtener las expectativas a lo largo del ciclo de vida, las cuales se introducirán en la HoQ del método QFD para obtener así diferentes propuestas conceptuales de diseño, 3) consiste en evaluar los diseños conceptuales de acuerdo con la serie de propiedades técnicas y su relación con los principales aspectos ambientales ponderados.
Incorporación de estrategias de ecodiseño Readiness Assessment for Implementing DFE Strategies (RAILS)	Hemel, (1995)	A partir del análisis ambiental del producto que puede realizarse mediante un ACV simplificado o completo, se aplica la Rueda de las Estrategias de Ecodiseño (LIDs) para evaluar opciones de mejora del producto. La información del producto de referencia se introduce en el diagrama y en base a las ocho estrategias empleadas, se extraen las opciones de mejora del producto. La viabilidad de las mejoras propuestas se estudia mediante un análisis DAFO con el fin de priorizar la implantación de las mejoras.
Despliegue de los objetivos ambientales Environmental Objective Deployment (EOD)	Karlsson (1997)	Integra la gestión ambiental en el desarrollo del producto. EOD se inspira en la matriz HoQ de QFD, pero solo considera la matriz de correlación para investigar la relación existente entre las consideraciones ambientales del producto. Etapas: 1) el propósito es encontrar un grupo de objetivos ambientales preliminares y uno de indicadores para expresarlos. Para obtener los indicadores, se aplica EOD para identificar los problemas ambientales interrelacionándolos con descriptores técnicos del producto analizado. 2) el modelo EOD se aplica para mejorar el producto utilizando los indicadores obtenidos en la revisión inicial, pero considerando fuertemente los requerimientos del consumidor.
Propuesta integrada para el desarrollo de productos sostenibles Integrated Approach to Sustainable Product Development	Hanssen et al. (1996)	Su objetivo es integrar la valoración del ciclo de vida del producto junto a los métodos disponibles referentes al desarrollo del producto y a su mejora en general. El método se basa en tres herramientas que valoran de forma independiente los requerimientos del consumidor, aspectos económicos y comportamiento ambiental del producto desde la perspectiva del ciclo de vida, es decir QFD, ACV y CCV, respectivamente. Finalmente la relación entre las diferentes opciones de mejora y los requerimientos del consumidor, los aspectos económicos y el comportamiento ambiental del producto, son estudiados de modo cualitativo, asignando una influencia positiva o negativa.
QFD-Verde Green-QFD (GQFD)	Bovea y Wang(2005)	Aplicando la estructura de la Casa de la Calidad, evalúa los conceptos alternativos de producto desde el punto de vista de calidad en la Casa de la Calidad (HoQ), desde el punto de vista ambiental en la Casa Ecológica (HoE) y desde el punto de vista del coste en la Casa del Coste (HoC). En cada una de las casas se obtiene un índice de calidad, ambiental y coste para cada alternativa, que se puede analizar de forma multicriterio para seleccionar el concepto que mejor satisface estos tres requerimientos.
Life Cycle Quality Function Deployment (LC-QFD)	Ernzer and Birkhofer (2005)	Consiste en la combinación de 3 Casas de la Calidad: Casa del Cliente (HoC), Casa del Medioambiente (HoE) y Casa de la Legislación (HoR). Estas casas traducen las necesidades del cliente, las características ambientales y legales en requerimientos del producto. Estas características finales derivadas de la VoC y del medio ambiente, pueden resultar opuestas, por lo que es el diseñador quien debe comparar y decidir qué características son más importantes en función del producto a diseñar. A partir de estos resultados se puede derivar la lista de requerimientos. En lo que se refiere a las características del producto procedentes de la HoR, los requerimientos se derivan directamente ya que deben ser cumplidos obligatoriamente.
Quality Function Deployment for Environment (QFD-E)	Masui et al. (2003)	Integra los requerimientos ambientales en la metodología del QFD con el objetivo de evaluar los conceptos mejorados. Consta de cuatro fases: la Fase I interrelaciona la voz del cliente (VoC) con las consideraciones ambientales (VoE) y las características de calidad (QC). En la Fase II se interrelacionan las características de calidad con los componentes. Los resultados de la fase I y II corresponden a la identificación de las características de calidad y a los componentes que deberían ser considerados. A continuación, el equipo de diseño revisa las opciones mejoradas del diseño evaluando estas alternativas de producto en la Fase III y IV. Finalmente se evalúan los efectos del nuevo diseño en la VoC y VoE, utilizando la información semicuantitativa presente en la correlación de las matrices de la Fase I y Fase II.
Despliegue de la función de calidad ambiental Environmentally Conscious Quality Function Deployment (ECQFD)	Vinodh (2009)	ECQFD permite la inclusión de aspectos ambientales así como costes generales, costes derivados de consideraciones ambientales y aspectos técnicos. La metodología considera la voz del usuario ambiental (recicladores y gobiernos, que establecen los aspectos ambientales), la voz del consumidor y las características técnicas y de ingeniería del producto. Se divide en 4 fases, en las que se ponderan los requerimientos ambientales y tradicionales considerados por el cliente obteniendo finalmente la puntuación total para cada ítem. Estos ítems se despliegan en componentes de producto y estos resultados se complementan con los obtenidos en la QFD sin considerar ahora la VoC y los EM. De esta forma se obtienen los componentes importantes y aplicando un método de evaluación se establecen las mejoras de diseño. El ACV, se emplea para calcular y evaluar el impacto de los productos y de los procesos, empleando la metodología del ACV simplificado propuesta por Kaebnerick et al. (2003).

Las metodologías basadas en el QFD permiten la integración de las demandas ambientales aplicando estructuras modificadas de la tradicional Casa de la Calidad (HoQ). **HoE** utiliza requerimientos ambientales en lugar de requerimientos de calidad, **E-QFD** combina ACV y HoQ con el propósito de evaluar propuestas de diseño alternativas, **RAILS** se centra en seleccionar opciones de mejoras ambientales a la vez que considera la situación de la compañía, y **EOD** aplica una modificación de la HoQ para identificar los problemas ambientales y las opciones de mejora durante las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. Las metodologías **G-QFD** y **LC-QFD** utilizan una combinación de varias Casas de la Calidad para integrar los requerimientos de calidad, ambiental y coste/legal. Finalmente **QFDE** considera la voz del cliente (VoC), las consideraciones ambientales (VoE) y las características de calidad (QC) para obtener diferentes alternativas de producto mejoradas y es la metodología ECQFD quien integra el ACV para asegurar el diseño sostenible de productos.

4.3 Metodologías basadas en el Análisis de Valor

Otro grupo de metodologías se basan en el Análisis de Valor (AV), que permite diseñar o rediseñar un producto de forma que asegure con mínimo coste, todas las funciones que el cliente desea y está dispuesto a pagar, y únicamente éstas. Fue originalmente desarrollada como técnica de reducción de costes, aunque ha evolucionado hacia un enfoque en el que el *valor* se concibe como la aceptación del producto por parte del consumidor. Bajo este enfoque, y con el fin de integrar el valor ambiental de los productos, se han desarrollado las metodologías mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Metodologías basadas en Análisis de Valor.

NOMBRE	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Eco-Re-Diseño Eco-Re-Design	Bovea and Wang (2007)	Permite integrar requerimientos ambientales en el desarrollo del producto, junto con el coste y las preferencias del usuario. Para ello combina la Casa de la Calidad de la QFD para analizar los requisitos ambientales, el ACV para analizar el comportamiento ambiental, el Coste del Ciclo de Vida (CCV) para analizar el coste. Con todo ello, es capaz de identificar las opciones de mejora ambiental aplicando un índice basado en el Análisis de Valor y en la disponibilidad a pagar de los usuarios por productos que incorporan dichas mejoras ambientales. La idea inicial reside en comparar el incremento que la incorporación de las mejoras ambientales producen en el ciclo de vida del producto, con el dinero adicional que el usuario está dispuesto a pagar por recibir los beneficios ambientales.
Análisis de Valor Ecológico Eco-Value Analysis (Eco-VA)	Oberender and Birkhofer (2004)	Integra los requerimientos técnicos, económicos y ambientales de los productos. Para ello, se establece una matriz donde las filas representan las funciones del producto. Cada componente del producto cuenta con tres columnas que se utilizan para asignar una cantidad a las funciones del producto (en %), impacto ambiental mediante la aplicación de la metodología ACV (método Eco-Indicador'99, en Pt), y costes (en \$). En la parte derecha de la matriz se dispone la asignación de la importancia para el consumidor, los impactos ambientales y los costes, para cada una de las funciones respectivamente.
Análisis del Coste del Ciclo de Vida Life Cycle Environmental Cost Analysis (LCECA)	Senthilkumaran et al. (2001)	Es un modelo matemático que define la relación entre el coste total del producto y los eco-costes asociados al ciclo de vida del producto. Pretende incluir estos eco-costes en el coste total del producto ya que representan tanto costes directos como indirectos derivados de los impactos ambientales causados a lo largo de todo su ciclo de vida. Se orienta hacia la reducción del coste total con la ayuda de alternativas verdes en cada una de las etapas del ciclo de vida del producto.

Estas metodologías analizan el coste de un producto desde una perspectiva de ciclo de vida e integrando los costes ambientales (costes externos) con los costes internos, mediante la aplicación del Coste del Ciclo de Vida (CCV). Mientras que la metodología **Eco-Re-Design** compara este valor con la disponibilidad a pagar del consumidor con el fin de otorgarle un valor al producto, la metodología **Eco-VA** analiza cada una de las funciones del producto, desde la perspectiva del usuario, ambiental y de coste. Finalmente el modelo matemático **LCECA** permite calcular el coste ambiental de forma independiente de cada uno de los componentes del producto de forma que se obtiene un coste global ambiental del producto.

4.4 Metodologías basadas en Análisis Modal de Fallos y Efectos

El Análisis Modal de Fallos y Efectos es una metodología que se utiliza para identificar, evaluar y prevenir deficiencias relacionadas con la seguridad de los productos. La

sustitución del factor seguridad por otros relacionados con el aspecto ambiental del producto ha dado pie a la creación de las metodologías detalladas en la Tabla 5.

Tabla 5. Metodologías basadas en Análisis Modal de Fallos y Efectos.

NOMBRE	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Impacto ambiental y análisis de factores Environmental Impact and Factor Analysis (EIFA)	Standford (1995)	Los principales aspectos ambientales a analizar de los productos son: reducir, reutilizar y reciclar. Para cada uno de los componentes individuales del producto, el EIFA cuantifica cada uno de estos tres aspectos en función de su intensidad/gravedad del efecto y su probabilidad de ocurrencia. Siguiendo este método sistemático, se evalúa un producto y se identifican las opciones potenciales de rediseño.
AMFE Ambiental Environmental FMEA (E-FMEA),	Nielsson et al. (1998)	La metodología tradicional del AMFE fue reestructurada y orientada hacia cuestiones ambientales, con el objetivo de identificar y evaluar los impactos ambientales potenciales en todas las etapas del ciclo de vida del producto durante su proceso de desarrollo. El propósito se centra en minimizar las cargas ambientales del producto durante su ciclo de vida, aplicando medidas correctoras y preventivas.
Eco-AMFE Eco-FMEA	Dannheim et al. (1998)	Desarrollada con el propósito de integrar el diseño para el medioambiente y los factores humanos. El objetivo de Eco-FMEA es identificar comportamientos erróneos así como su influencia en los datos de inventario del ciclo de vida y en las causas humanas. Eco-FMEA se deriva de la metodología tradicional del AMFE y tras valorar la probabilidad de ocurrencia y evaluación del comportamiento erróneo, se identifican las medidas de re-diseño.

Como se observa en la Tabla 5, **EIFA** considera las cuestiones ambientales relacionadas con la reducción, reutilización y reciclaje en lugar de los fallos de componentes, **E-FMEA** permite identificar y evaluar los impactos ambientales potenciales en lugar de los fallos potenciales del producto, y **Eco-FMEA** identifica los comportamientos erróneos, su influencia en el ciclo de vida y las causas humanas relacionadas con los mismos.

4.4 Otras metodologías

Kobayasi (2006) propone una nueva metodología denominada Planificación del Ciclo de Vida (**LCP**, Life Cycle Planning) que combina la Casa de la Calidad del QFD con ACV y TRIZ, con el fin de integrar la calidad, el coste y los aspectos ambientales de forma sistemática en las primeras etapas del diseño de un producto desarrollando por tanto. Para ello combina una serie de matrices: Matriz de la Casa de la Calidad, Matriz de Eco-Especificaciones y Matriz de Contradicciones de TRIZ.

Sakao (2009) propone la metodología **Quality Engineering for Early Stage of Environmentally Concious Design**, que combina el método KANO (Kano, 1984) para analizar el comportamiento de los consumidores (cómo sienten), y el método CRR (*Consequence & Reason for Requirement*) para analizar la respuesta de los consumidores (cómo responden). El objetivo se centra en determinar cómo se siente el consumidor respecto a los aspectos ambientales planteados y en valorar su disposición a pagar por ellos, así como comunicarlos a la empresa.

Finalmente, Benedetto y Klemes (2009) proponen el Mapa Estratégico de Comportamiento Ambiental (**Environmental Performance Strategy Map**), que permite analizar los impactos ambientales desde una amplia perspectiva usando indicadores para huella de carbono, agua, energía, emisiones y seguridad en el trabajo. Estos indicadores se sitúan en una dimensión del mapa gráfico. El coste se considera en una dimensión adicional en forma de pirámide, de forma que el volumen de la misma representa una visión general del impacto ambiental y de coste del elemento en cuestión. Este gráfico proporciona un indicador denominado Indicador Sostenible de Comportamiento Ambiental (*Sustainable Environmental Performance Indicator*) como una medida individual para que la sostenibilidad de la opción planteada pueda compararse con diferentes opciones estratégicas, pudiendo así facilitar las decisiones finales a tomar por el equipo de diseño.

5. Discusión y Conclusión

Este amplio abanico de herramientas descrito anteriormente se ha desarrollado para facilitar la integración del requerimiento ambiental en el diseño de productos. Con el fin de proporcionar unos criterios de selección de la herramienta más adecuada para cada caso, se propone en la Tabla 6 una clasificación de acuerdo a los siguientes criterios:

- Metodología empleada para evaluar el aspecto ambiental: lista de comprobación, LCA, etc.
- Requerimientos tradicionales integrados junto a aspectos económicos: legal, económico, funcional, seguridad, etc.
- Metodologías de diseño tradicionales utilizadas como referencia: matrices de diseño, QFD, AMFE, Análisis de Valor, método KANO, TRIZ.
- Si las metodologías han sido aplicadas de forma práctica o no y en algún caso de aplicación.

Tal y como se ha indicado en el apartado 3 de la comunicación, las características que debe presentar cualquier herramienta de eco-diseño son: poder ser aplicadas en las primeras etapas del diseño de producto, tener un enfoque de ciclo de vida completo del producto y considerar simultáneamente tanto requerimientos ambientales como tradicionales (enfoque multicriterio). Por ello las metodologías más completas y cuyos resultados y alternativas de diseño responderán de forma más efectiva a las demandas y a los diferentes requerimientos, son aquellas en las que como mínimo, se integre los aspectos ambientales, legales y las necesidades del usuario. La relación entre los dos primeros aspectos (ambiental y legal) se está viendo cada vez más reforzada gracias a la legislación que recientemente se está desarrollando a nivel europeo relativa a la obligatoriedad de considerar el aspecto ambiental en el diseño de los productos (Directiva 2005/32/CE relativa al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía y Directiva 2009/125/CE relativa al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía).

A pesar del elevado número de herramientas desarrolladas para considerar e integrar los aspectos ambientales en el diseño de productos, su uso no es generalizado. La mayor parte de estas metodologías de ecodiseño no son aplicadas de forma sistemática en las empresas. El tiempo invertido en las mismas así como la complejidad de utilización, la escasa practicidad y el lenguaje técnico de utilización, son las limitaciones principales que encuentran las empresas a la hora de su implantación. Por ello estas herramientas de apoyo, imprescindibles para la integración de los requisitos ambientales, deben ser sencillas de utilizar, no requerir conocimientos demasiado técnicos o específicos ni grandes inversiones de tiempo.

Tabla 6. Clasificación de las metodologías que integran requerimientos ambientales en el diseño de producto.

	Metodología para evaluación de requerimientos ambientales	Requerimientos del producto									Metodologías basadas en						Aplicación práctica en productos	
		usuario	técnicos	función	coste	cultural	empresa	salud	seguridad	legal	Matriz de diseño	QFD	AMFE	AV	WIP	KANO		TRIZ
Matriz de Requerimientos (Requirements Matrix)	matriz semi-cualitativa			✓	✓	✓				✓	✓							✓
Matriz DFE (DFE Matrix)	matriz semi-cualitativa							✓	✓		✓							
Casa de la Ecología House of Ecology (HoE)	indicador ambiental	✓			✓						✓							✓
QFD ambiental Environmental-QFD (E-QFD)	ACV simplificado	✓	✓									✓						
Incorporación de estrategias de ecodiseño Readiness Assessment for Implementing DFE Strategies (RAILS)	matriz MET, ACV simplificado, ACV	✓					✓											
Despliegue de objetivos ambientales Environmental Objective Deployment (EOD)	matriz de diseño, ACV simplificado, ACV	✓	✓									✓						✓
Enfoque integrado de desarrollo sostenible de productos Integrated Approach to Sustainable Product Development	ACV	✓	✓		✓							✓						✓
QFD Verde Green QFD (GOFD)	ACV	✓	✓		✓							✓						✓
Casa de la calidad del ciclo de vida Life Cycle House of Quality (LC-HoQ)	ACV	✓	✓						✓		✓		✓					✓
Despliegue de la función de calidad ambiental Quality Function Deployment for Environment (QFDE)	indicadores ambientales	✓	✓								✓							✓
Metodología de Eco-Re-Diseño Eco-Re-Design Methodology	ACV	✓	✓		✓							✓		✓	✓			✓
Análisis del Valor Eco Eco-Value Analysis (Eco-VA)	ACV	✓		✓	✓									✓				✓
Análisis del impacto y factor ambiental Environmental Impact and Factor Analysis (EIFA)	indicadores ambientales			✓								✓						
Análisis del modo de Fallos y Efectos Ambiental Environmental Failure Mode Effects Analysis (E-FMEA)	indicadores ambientales			✓								✓						✓
Eco-AMFE Eco-FMEA	indicadores ambientales / LCI	✓		✓					✓			✓						✓
QFD ambiental y ACV Environmentally Conscious QFD (ECQFD) and (LCA)	ACV	✓	✓		✓		✓				✓							✓
Análisis del Coste del Ciclo de Vida Life Cycle Environmental Cost Analysis (LCECA)	ACV				✓													
Planificación del ciclo de vida-TRIZ Life cycle planning (LCP) TRIZ	ACV			✓	✓						✓						✓	✓
Diseño ambiental de productos Early Stage of Environmentally Conscious Design	KANO	✓			✓												✓	✓
Mapa Estratégico de Comportamiento Ambiental Environmental Performance Strategy Map	Indicadores ambientales				✓			✓										✓

6. Referencias

- Akao, Y. (1990). *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*. Cambridge: Productivity Press Inc.
- Altshuller G.S. (1988). *Creativity as an Exact Science*. NY, USA: Gordon and Breach.
- Benedetto, J., Klemes, A. (2009). The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process. *Journal of Cleaner Production*, 17, 900-906.
- Bennett, E.B., Graedel, T.E. (2000). Conditioned air: evaluating an environmentally preferable service. *Environmental Science and Technology*, 34 (4), 541-545.
- Beskow, C., Ritzén, S. (2000). Performing changes in product development: a framework with keys for industrial application. *Research in Engineering Design*, 12 (3), 172-190.
- Brent, A.C., Labuschagne, C. (2004). Sustainable life cycle management: indicators to assess The sustainability of engineering projects and technologies. *Proceedings of the Internacional Engineering Management Conference*.
- Betz, G., Vogl, H. (1996). *Das umweltgerechte product: praktischer leitfaden für das umweltbewubte entwickeln, gestalten and fertigen*. Berlin: Luchterhand Verlag.
- Bovea, M.D., Wang, B. (2005). Green Quality Function Deployment: a methodology for integrating customer, cost and environmental requirements in product design. *International Journal of Environmentally Conscious & Manufacturing*, 12 (3-4), 9-19.
- Bovea, M.D., Wang, B., 2007. Redesign methodology for developing environmentally conscious products. *International Journal of Production Research* 45 (18-19), 4057 - 4072.
- Brezet, H., van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: a Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*. Paris: UNEP Ed.
- COM 68 (2001) Green Paper on Integrated Product Policy.
- Conteras, A.M., Rosa, E., Prez, M., Langenhove, H.V., Dewulf, J. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* 17, 772-779.
- Dannheim, F., Grüner, C., Birkhofer, H. (1998). Human factors in design for environment. *Proceedings of the 5th International Seminar on Life Cycle Engineering*. Stockholm, Sweden.
- Davidsson, B. (1998) *Modified Product Quality Tools for Improved Environmental Design in Small and Medium Sized Enterprises*. IIIIEE Master's Theses 98:9. International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, Lund, Sweden.
- EN 12973, 2002. *Value Management*.
- Ernzer M., Birkhofer H. (2005). *Requirements for Environmentally Friendly and Marketable Products. In Environmentally-Friendly Product Development. Methods and Tools*. Ed. by Abele E., Anderl, R., Birkhofer H. Ed. Springer-Verlag London Limited.
- Gerstakis, J., Lewis, H., Ryan, C. (1997). *A Guide to Ecoresign - Improving the Environmental Performance of Manufactured Products*. Centre for Design at Royal Melbourne Institute of Technology, RMIT, Melbourne, Australia.
- Graedel, T.E., Allenby, B.R. (1996). *Design for Environment*. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), USA.
- Halog, A., Schultmann, F., Rentz, O. (2001). Using quality function deployment for technique selection for optimum environmental performance improvement. *Journal of Cleaner Production* 9, 387-394.
- Hanssen, O.J., Rydberg, T., Ronning, A. (1996). *Integrating Life-cycle Assessment in Product Development and Management*. In: Curran M A (ed) *Environmental Life Cycle Assessment*. Mc Graw Hill.
- Hemel, C.G. (1995). Tools for setting realizable priorities at strategic level in design for environment. *Proceedings of the 10th International Conference on Engineering Design (ICED'95)*, Praha, Czech Republic, pp 1040-1047.
- ISO 14040 (2006). *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*.
- ISO 14044 (2006). *Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*.
- ISO GUIDE 64 (2008). *Guide for Addressing Environmental Issues in Product Standards*.
- ISO/TR 14062 (2002). *Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development*.
- Johnson, E.F., Gay, A. (1995). A practical, customer-oriented DFE methodology. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Orlando (FL), USA, pp 47-50.

- Kano, N. (1984). Attractive Quality and Must-be Quality. *Quality JSQC*, 14 (2).
- Karlsson, M. (1997). *Green Concurrent Engineering: Assuring Environmental Performance in Product Development*. IIIIEE Licentiate Thesis, International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, Lund, Sweden.
- Keoleian, G.A., Koch, J.E., Menerey, D. (1995). *Life Cycle Design Framework and Demonstration Projects*. EPA/600/R-95/107. Cincinnati, USA.
- Kobayasi H. (2006). A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. *Advanced Engineering Informatics*, 20, 113-125.
- Lenau, T., Bey, N. (2001). Design for environmentally friendly products using indicators. *Proc. Instn. Mech. Engrs*. 215 (B), 637-645.
- Meinders, H. (1997). *Point of no Return. Philips Eco-design Guidelines*. Eindhoven.
- Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., Inaba, A. (2003). Applying quality function deployment to environmentally conscious design. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20 (1), 90-106.
- Navinchandra, D. (1991). Design for environmentally. *Design, Theory and Methodology (ASME)* 31, 99-125.
- Nielsson, J., Lindahl, M., Jensen, C. (1998). The information flow for efficient design for environmental: analysis of preconditions and presentation of a new tool. *Proceedings of CIRP, 5th International Seminar on Life-Cycle Engineering*, Stockholm, Sweden.
- Oberender C., Birkhofer H. (2004). The eco-value analysis. An approach to assigning environmental impacts and costs to customers' demands. *Proceedings of the International Design Conference. DESIGN 2004*, Dubrovnik, Croatia.
- Senthikumar, D., Ong, S.K., Tan, B.H., Nee, A.Y.C. (2001). Environmental life cycle cost analysis of products. *Environmental Management and Health* 12 (3), 260-276.
- Stamatis, H. (1995). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQC Quality Press, Milwaukee (WI), USA.
- Stanford University (1995). *Environmental Impact and Factor Analysis*. Course ME217B Design for Manufacturability HP-FDE. Stanford University, Palo Alto (CA), USA.
- Vinodh, S., Rathod, G. (2009). Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. *Journal of Cleaner Production Research*, 37, 1075-1091.
- Wimmer, W. (1999). Environmental improvements of a citruspress using the eco-design checklist method. *Proceedings of the 12th International conference on engineering design (ICED'99)* Munich, Germany.
- Wimmer, W., Züst, R., Lee, K.M. (2004). *Ecodesign Implementation. A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development*. Springer. Dordrecht. The Netherlands.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación y Generalitat Valenciana la financiación recibida para la realización de este estudio (Proyecto DPI2008- 04926 y ACOMP/2010/257, respectivamente).

Correspondencia

María Dolores Bovea Edo. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I. Castellón. España.
Tel.: 964 72 81 12, Fax: 964 72 81 06.
E-mail: bovea@emc.uji.es