Diseño sostenible en impresión 3D: estado del arte

Sustainable design in 3D printing: state of the art

Luis Suárez, María del Mar Espinosa y Manuel Domínguez
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Ingeniería del Diseño. C/ Juan del Rosal,12 - 28040 Madrid (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9447 | Recibido: 21/10/2019 • Inicio Evaluación: 29/10/2019 • Aceptado: 18/01/2020

ABSTRACT

- This paper assesses existing tools for the use of sustainability concepts in the industrial design field, specially focusing on the needs of developing specific tools for the sustainable design in Additive Manufacturing. A first reflexion about eco-design is shown, following with a deep study of eco-design methodologies and ending with a comparative assessment of different existing tools and their possibilities of use in the design of parts for 3D printing.
  The literature shows the great interest in this issue, as there are different studies comparing the environmental impact of some parts obtained by additive manufacturing compared to those produced by conventional technologies, although it has detected a lack in references establishing general considerations for designing more sustainable products by additive manufacturing, as part of the design process itself.
- **Keywords:** Eco-design, sustainability, additive manufacturing, 3D printing, life cycle analysis.

RESUMEN

Este artículo trata sobre el estudio de las herramientas existentes para la aplicación de conceptos de sostenibilidad en el campo del diseño industrial, centrándose especialmente en la necesidad de desarrollo de herramientas específicas destinadas al diseño sostenible para la fabricación aditiva. Se realiza en primer lugar una reflexión acerca del concepto de ecodiseño para a continuación ahondar en la búsqueda de metodologías de ecodiseño, finalizando con el estudio comparativo de diferentes herramientas existentes y sus posibilidades de uso en el diseño de piezas para impresión 3D.

La bibliografía consultada muestra el gran interés de esta cuestión, pues existen diferentes estudios que comparan el impacto ambiental de algunas piezas obtenidas por fabricación aditiva frente a las producidas mediante tecnologías convencionales, si bien se ha detectado una carencia en referencias que establezcan consideraciones generales para el diseño de productos más sostenibles, mediante fabricación aditiva, como parte del propio proceso de diseño.

Palabras clave: Ecodiseño, sostenibilidad, fabricación aditiva, impresión 3D, análisis de ciclo de vida.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño agrupa un conjunto de recursos, metodologías y herramientas orientados a generar un producto con unas características determinadas, en función de las expectativas del consumidor y del mercado al que se dirige; al integrar criterios ambientales como un requisito más a satisfacer, se pasa del "diseño" al "ecodiseño". Para Karlsson y Lusttropp: "el ecodiseño trata sobre el diseño en y para un contexto de desarrollo sostenible" [1]. De manera general se puede definir el ecodiseño como una metodología que permite detectar, medir y ponderar los impactos ambientales generados a lo largo del ciclo de vida de un producto, basándose en el principio de prevención, ya que se aplica desde las etapas iniciales de diseño. Además de los beneficios medioambientales, estas estrategias permiten reducir costes, reforzar la marca y la imagen del producto o servicio, así como mejorar el margen de beneficios [2]. Además, la sociedad actual reconoce la sostenibilidad como uno de los principales factores que aceleran la innovación [3].

Por otra parte, la implantación de los procesos de fabricación aditiva (FA) en la industria actual es un hecho contrastado, encontrándose estos sistemas en empresas de diversos sectores y tamaños, en centros tecnológicos y universidades, centros de enseñanza primaria y secundaria e, incluso, en los hogares de muchas personas [4–6]. Generalmente, las tecnologías al alcance de las pequeñas empresas, instituciones y usuarios particulares son comúnmente denominadas tecnologías de impresión 3D, refiriéndose, fundamentalmente, a las tecnologías basadas en deposición de material fundido. El abaratamiento de los costes de esta tecnología, generalmente conocida como deposición de material fundido (DMF) o fabricación con filamento fundido (FFF), ha permitido una gran expansión de pequeños dispositivos basados en ella [4], teniendo por tanto una presencia cada vez más amplia en los más diversos sectores productivos. Sin embargo, este tipo de tecnologías presentan algunos retos para la sostenibilidad medioambiental. Algunas de estas cuestiones son el uso de materias primas, los residuos generados, la sobreexplotación de la tecnología para aplicaciones superfluas, la liberación de compuestos orgánicos volátiles o el consumo energético.

Varios autores coinciden en la necesidad de realizar estudios profundos para comparar y evaluar el impacto medioambiental generado al producir una pieza mediante impresión 3D frente a los procesos convencionales de fabricación [7,8]. Es frecuente pensar que las tecnologías de fabricación aditiva presentan un mejor balance medioambiental que las tradicionales, pues el consumo de material se encuentra por debajo del necesario para las tecnologías tradicionales, siendo en muchos casos la cantidad de material necesaria para obtener una pieza muy próxima a la cantidad de material de la pieza final. Sin embargo, es necesario tener en cuenta otros aspectos, como el consumo energético, la durabilidad y desempeño de la pieza, la reciclabilidad del material...

En resumen, diversos trabajos de investigación se centran en la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de medición de parámetros y de cálculo del impacto ambiental generado por los produc-

tos obtenidos mediante tecnologías de FA, que tengan en cuenta toda la cadena de producción (desde la obtención de los materiales a emplear hasta el fin de vida del producto), el relativamente corto periodo de vida de muchos de estos productos, el rediseño de dichos productos atendiendo a la libertad y capacidades proporcionadas por estos sistemas, el cambio en las cadenas de distribución y las propias especificidades de cada uno de los sistemas.

Hasta la fecha no se ha encontrado ninguna metodología de amplia aceptación para el cálculo del impacto ambiental generado por estas tecnologías, dado el gran número de factores a tener en cuenta y la complejidad en el desarrollo de estas metodologías, si bien sí hay algunos avances en esta cuestión, que se están trabajando en comités de normalización, tanto ASTM como ISO. Tampoco se ha encontrado una guía de fácil uso para la aplicación de criterios de ecodiseño al proceso de diseño y desarrollo de productos.

2. VISIÓN GENERAL SOBRE METODOLOGÍAS DE ECODISEÑO

Existe una amplia variedad de herramientas de ecodiseño, y varias clasificaciones posibles, siendo la más conocida la de Byggeth [9]:

- Herramientas de análisis preliminar: orientadas a establecer los diferentes requerimientos de diseño.
- Herramientas de análisis detallado: se emplean en las fases intermedias del proceso de diseño, con el objetivo de permitir la valoración de diferentes opciones de diseño y elegir la más adecuada.
- Herramientas de comunicación: para mostrar las cualidades ambientales de los productos en el mercado.

Entre las herramientas de análisis detallado más empleadas se encuentra el análisis de ciclo de vida (ACV). De acuerdo con la norma UNE-ISO 14050:2005, se define ciclo de vida como "las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales, hasta la disposición final" [9]. Esta herramienta se aplica siguiendo las normas ISO 14040 y 14044 [10], y se basa en la realización de un inventario de los flujos de entrada y salida de energía, materiales, emisiones y residuos. A continuación, se evalúan los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, empleando bases de datos de ecoindicadores, que permiten la obtención de resultados comparables para diferentes alternativas de diseño. Cuando se habla de ACV las herramientas comerciales más destacadas son SimaPro, GaBi, TEAM y LCA Manager, que permiten seleccionar diferentes métodos de cálculo para la obtención de indicadores ambientales, calcular la huella de carbono de un producto o realizar el ACV de un producto, entre otras [11–14].

Existen otras herramientas gratuitas para el cálculo del ACV, como OpenLCA, si bien es necesario disponer de las bases de datos de materiales y procesos para poder ejecutar el análisis, bien mediante datos propios obtenidos de la investigación o mediante la adquisición de las bases de datos. Algunos autores han propuesto también módulos para la integración de estas herramientas en programas de diseño asistido, tales como SolidEdge y SimaPro o EcoFit con 3DSMax [15], o como el módulo Sustainability Xpress de SolidWorks [9]. Sin embargo, es necesario resaltar que estas herramientas se enfocan más bien a la determinación de la huella de carbono del producto diseñado, de manera menos rigurosa y más aproximada que las herramientas anteriormente mencionadas.

Uno de los principales defectos encontrados en las herramientas disponibles es que estas van enfocadas más a la gestión o a la realización de análisis retrospectivos que al propio proceso de diseño [16]. Algunos de los aspectos críticos a mejorar en estas herramientas se pueden resumir en la falta de información relevante para el diseñador industrial, la falta de una lista de aspectos cortos y decisivos a tener en cuenta en el proceso de diseño, la falta de ejemplos inspiradores de aplicación y casos de éxito, el gran consumo de tiempo necesario para el manejo de las mismas, así como el carácter en general excesivamente técnico y complejo.

Algunos intentos fueron la creación de la página en internet "Information/Inspiration", creada en base a los estudios de Lofthouse en la Loughborough University [16], o la también "Flowmaker" [17], generada por el estudio de diseño WeMake. Sin embargo, ninguna de estas dos herramientas se encuentra actualmente en uso.

La falta de un enfoque holístico ha sido también puesta en evidencia por otros autores [18,19]; Buchert y colaboradores proponen el uso sinérgico de diferentes herramientas de ecodiseño, de manera secuencial en las diferentes etapas de diseño [18]. Como resultado de su estudio han producido una guía de ayuda para la implementación de herramientas de ecodiseño con tres objetivos específicos: producción, gestión y comunicación. Se trata de "Eco-Tool seeker", una herramienta gratuita que consta de 35 preguntas que permite guiar al usuario hacia la selección de la herramienta más apropiada en función de diferentes parámetros, tales como [20]:

- Tipo de proyecto: ecodiseño de un proceso o producto, implementación de conceptos de ecodiseño en el sistema de gestión, o implementación de herramientas de comunicación.
- Herramientas de diagnosis o cómo actuar para mejorar el comportamiento ambiental de un producto/servicio.
- Tipo de herramienta: cuantitativa o cualitativa.
- Herramientas de carácter normativo o no, genéricas o para un sector específico.
- Herramientas de comunicación internas o externas.

La simplicidad proporcionada por la página en internet "Eco-Tool seeker" [19,20], basada en una serie de cuestiones sencillas que permiten dirigir al usuario en el proceso de ecodiseño, es una interesante aportación en este campo potencialmente útil para ser tomada como base para el desarrollo de una herramienta que forme e informe a los usuarios acerca de conceptos de ecodiseño y sostenibilidad, y que sirva de guía en la aplicación de los mismos a lo largo del proceso de diseño para impresión 3D.

3. SOSTENIBILIDAD EN FABRICACIÓN ADITIVA

En cuanto a la aplicación de metodologías de ecodiseño en procesos productivos basados en fabricación aditiva, diversos autores coinciden en el potencial de dichas tecnologías para conseguir procesos productivos más sostenibles [21,22], si bien también resaltan la necesidad de adaptar los procesos y herramientas convencionales a las particularidades de los procesos de fabricación aditiva [8,21–25]. De hecho, algunos autores afirman que las tecnologías de FA encajan perfectamente en los modelos de economía circular, fundamentalmente debido a la reducción en el consumo de material y en la extensión del tiempo de vida de los productos debido a la posibilidad de obtener piezas de repuesto cuando se necesiten [26,27].

Despeisse y Ford [22] consideran también la FA como una herramienta prometedora para acercar los sistemas productivos a la sostenibilidad, debido a la posibilidad de eliminación de almacenaje por la fabricación bajo demanda y por las cadenas de valor más cortas debidas a la producción localizada, si bien destacan

que generalmente la producción localizada es menos ecoeficiente [22,28]. Para conseguir un avance real hacia una economía circular, estos autores plantean la necesidad de valoración de las elevadas tasas en la obsolescencia de productos obtenidos mediante FA, las demandas del mercado de bienes personalizados y el incesante incremento en el consumo de recursos como elementos clave para conseguir disponer de sistemas de FA sostenibles. Diversos artículos analizados destacan la importancia de los materiales, los parámetros de proceso, la exposición a las emisiones generadas en el proceso de fabricación, y la distribución de la cadena de suministros como principales puntos en los que actuar para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de FA [28–32].

Otros autores [24] coinciden en la necesidad de desarrollar métodos específicos para caracterizar la sostenibilidad de las tecnologías de FA, basados en métodos científicos y en la colaboración con entidades de estandarización. Algunos incluso van más allá e indican que los estudios de sostenibilidad basados en ACV no son válidos para su aplicación en el sector de la FA [8,29,33,34], debido a las limitaciones establecidas en la definición de los objetivos y los límites establecidos en dicha metodología, y a que esta metodología no tiene en cuenta algunos aspectos como la libertad de diseño que ofrecen estas tecnologías [8,30]. Para solventar esto, Tang [8] propone la integración del diseño en la metodología del ACV, de manera que la entrada al sistema sea la descripción de las características funcionales del producto, en lugar del diseño en sí del producto; Le Bourhis [35], por su parte, propone una metodología basada en la evaluación de todos los flujos del proceso de fabricación, generando un modelo predictivo de consumo, definido a partir del modelo informático del producto a fabricar. Liu [36] considera también esencial la integración del diseño asistido con los estudios de análisis de ciclo de vida como paso esencial para mejorar la sostenibilidad de los productos obtenidos por FA.

En cuanto a la sostenibilidad de los propios sistemas de FA, Mani y colaboradores plantean una guía general que proporciona un marco de medidas para mejorar la sostenibilidad de los procesos de fabricación, y que permite la comparación entre diferentes procesos de FA [24]. Este estudio se centra en examinar los impactos medioambientales de las tecnologías de fabricación aditiva para a continuación proponer una metodología para la determinación de la sostenibilidad de estos sistemas. Esta propuesta se basa en las cuatro etapas del ciclo PDCA (del inglés *plan – do – check – act*, planear-hacer-comprobar-actuar): el primer paso consiste en comprender el proceso y recolectar datos, el segundo en llevar a cabo el cálculo de sostenibilidad del proceso, teniendo en cuenta los valores de consumo de energía, material, agua..., el tercero se centra en realizar una comparativa con modelos teóricos o con los valores medios de los indicadores para otros procesos empleados en la industria y el último en la propuesta de un plan de acción para incrementar la sostenibilidad del proceso. De nuevo, este estudio [24] concluye indicando que se necesita desarrollar métodos de caracterización de la sostenibilidad de las tecnologías de FA basados en la ciencia, si bien se hace énfasis en la necesidad de colaborar con organizaciones de normalización; afirman además que el estudio profundo de los parámetros necesarios para determinar la sostenibilidad de estos procesos y el trabajo conjunto con estas organizaciones de estandarización permitiría ampliar aún más el rango de aplicaciones de estas tecnologías.

Laverne y colaboradores [23] han propuesto la herramienta TEAM (del inglés *tool for eco additive manufacturing*, herramienta para la eco–fabricación aditiva), cuyo objetivo es la optimización del comportamiento ambiental de piezas obtenidas por fabricación aditiva en las etapas tempranas de diseño. Esta metodología se basa en una serie de parámetros de fabricación, tales como el tipo de máquina disponible, los materiales a emplear y las estrategias a aplicar (minimización del consumo de material o de energía, o su combinación). En una primera etapa se selecciona la máquina específica a usar, en la segunda se introduce el diseño de la pieza, el material a emplear y el número de piezas a fabricar; una vez hecho esto se activa el lazo de control y se definen los parámetros óptimos de fabricación. Este estudio concluye realzando la necesidad de extender y mejorar esta herramienta para cuantificar el impacto ambiental de los productos obtenidos por FA.

Baumers y colaboradores [31] van aún más lejos al resaltar la importancia de llevar a cabo los ACV en el contexto de una escasez potencial de recursos. Según estos autores, debe incluirse en el ACV aspectos adicionales a la etapa de fabricación, tales como la obtención de los materiales empleados por estas tecnologías, el impacto de tecnologías auxiliares, el postprocesado, la inspección y el fin de vida del producto. El trabajo desarrollado por Liu y colaboradores [36] también enfatiza acerca de lo complicado de establecer conclusiones generales acerca de la sostenibilidad de los sistemas de FA, por lo que indican que el impacto ambiental de la fabricación por impresión 3D "debe analizarse caso a caso en base a situaciones específicas".

Finalmente, Peng [37] pone de relieve el concepto de ecodiseño y su aplicación en las tecnologías de fabricación aditiva como una gran oportunidad para mejorar y completar las capacidades de diseño de dichos procesos.

4. DISCUSIÓN

En resumen, queda claro el gran interés existente por el estudio del impacto ambiental generado por las tecnologías (y los productos) de fabricación aditiva, así como la necesidad de adaptar los procesos y metodologías de diseño y de ecodiseño a las capacidades propias de dichas tecnologías. A pesar de la existencia de diversas metodologías, la revisión bibliográfica llevada a cabo muestra que existen aún numerosas barreras por las cuales el ecodiseño no se encuentra más extendido a nivel empresarial, fundamentalmente relacionadas con la alta especificidad de dichas herramientas y el alto nivel de conocimientos requeridos para su manejo.

4.1. HERRAMIENTAS DE ECODISEÑO

Algunos de los aspectos críticos a mejorar en las herramientas de ecodiseño actualmente disponibles se pueden resumir en [16]:

- Falta de información relevante para el diseñador industrial.
- La falta de formación e información.
- Falta de ejemplos de aplicación y casos de éxito.
- Gran consumo de tiempo.
- Alta especificidad de las herramientas.
- Falta de cultura medioambiental.

La herramienta gratuita "Eco-Tool seeker", desarrollada por Rousseaux y colaboradores [19], se basa en una serie de preguntas para guiar al usuario hacia aquellas herramientas de ecodiseño que le sean de aplicación, en función del tipo de proyecto y el tipo de herramienta a emplear; sin embargo, su uso no da pautas acerca de la aplicación de conceptos de ecodiseño en el propio proyecto de diseño industrial. No obstante, la simplicidad de esta herramienta en internet es una interesante aportación en este campo, y es por ello que se toma como base para el desarrollo de una herramienta que forme e informe a los usuarios acerca de

conceptos de ecodiseño y sostenibilidad, y que sirva de guía en la aplicación de los mismos a lo largo del proceso de diseño.

4.2. MATERIALES, CONSUMO DE ENERGÍA Y PARÁMETROS DE FABRICACIÓN

El estudio bibliográfico muestra el potencial de las tecnologías de fabricación aditiva para conseguir procesos productivos más sostenibles, si bien también resalta la necesidad de adaptar los procesos y herramientas convencionales a las particularidades de dichos procesos de fabricación. Los aspectos medioambientalmente más positivos de estas tecnologías son la reducción en el consumo de material, respecto a los procesos de fabricación convencionales, y, sobre todo, las posibilidades de aumentar el tiempo de vida de los productos mediante la fabricación de piezas de repuesto.

Los aspectos fundamentales sobre los que incidir para mejorar el comportamiento ambiental de los sistemas de FA son:

- Materiales: optimización de la cantidad de material, posibilidades de reciclado, uso de biomateriales o materiales compuestos.
- Optimización de los parámetros de proceso: estrategia de fabricación, altura de capa, velocidad de fabricación…
- Control de las emisiones generadas: COV y partículas.
- Estrategias de distribución.

A pesar de la importancia de los materiales en el desempeño medioambiental final de los productos obtenidos por FA, ciertos aspectos no son fácilmente abordables por los usuarios de estas tecnologías (el uso de materiales compuestos, por ejemplo, o el reciclado de piezas fallidas), aunque sí hay otros que pueden tenerse en cuenta para disminuir el impacto ambiental, sin afectar al periodo de vida del producto, tales como las estrategias de relleno o de fabricación (altura de capa, posición de la pieza, uso de material soporte…). Deberían ser estos aspectos, pues, los que se aborden en la guía de ecodiseño que se generará como consecuencia de este estudio.

De la misma manera, en relación al consumo energético, se puede optimizar la estrategia de fabricación para minimizar el consumo de energía, o plantear la fabricación de varias piezas a la vez, pero poco más puede hacerse. La mejor opción sería, pues, recurrir a sistemas de fabricación de bajo coste energético (deposición frente a sinterizado láser, por ejemplo), si bien esto no siempre es posible, por los requerimientos de la pieza o del material a emplear.

En cuanto a la producción deslocalizada frente a la centralizada, existe aún controversia acerca de la conveniencia de uno u otro sistema. Sí es innegable, sin embargo, la necesidad de aumentar los conocimientos y la concienciación de los diseñadores y, en general, de los usuarios de las tecnologías de FA, de manera que las cuestiones medioambientales se integran en las prácticas habituales de dichos usuarios. Algunas cuestiones a tener en cuenta son la reutilización y reciclado de piezas o la reducción de las operaciones de postprocesado.

Por tanto, el estudio realizado ha permitido resaltar la importancia (y la necesidad) de generar una guía que permita a los diseñadores el manejo de ciertos conceptos y herramientas de ecodiseño para la mejora del comportamiento ambiental de los productos así obtenidos.

La segunda parte del estudio bibliográfico se centró en la búsqueda de la aplicación de metodologías y herramientas de ecodiseño enfocadas a procesos de fabricación aditiva. Numerosos autores coinciden en que los estudios de sostenibilidad basados en análisis de ciclo de vida (o en otras herramientas convencionales) no son válidos para su aplicación en el sector de la FA, debido a las limitaciones planteadas en la definición de los objetivos y los límites del sistema, y a que estas metodologías no tienen en cuenta algunos aspectos como la libertad de diseño que ofrecen estas tecnologías.

Mani y colaboradores [24], por ejemplo, han planteado una guía general para la mejora de la sostenibilidad de los procesos de fabricación, basada en las cuatros etapas del ciclo PDCA. El estudio de Laverne [23], por su parte, concluye con la creación de la herramienta TEAM, cuyo objetivo es la optimización del comportamiento ambiental de piezas obtenidas por fabricación aditiva en las etapas tempranas de diseño.

5. CONCLUSIONES

El estado del arte sobre la sostenibilidad de los sistemas de fabricación aditiva se ha revelado como un campo de estudio de gran interés. Si bien existe una gran cantidad de información y estudios científicos al respecto, actualmente no hay consenso sobre su sostenibilidad. Además, no se ha encontrado ninguna herramienta especializada en el estudio del impacto ambiental de los productos obtenidos por FA, ni ninguna herramienta que permita mejorar la sostenibilidad de las piezas obtenidas por impresión 3D.

En base a las reflexiones y propuestas de mejora formuladas por otros autores, así como la observación y análisis propio, se ha determinado la necesidad de generar una herramienta intuitiva, rápida y fácil de utilizar para guiar a los usuarios de los sistemas de FA hacia un proceso de diseño más sostenible.

Sobre la base de todo lo anterior, se determina la necesidad de desarrollar una herramienta de capacitación e información, dirigida a los diseñadores industriales y a los usuarios de las tecnologías de FA para la que, la revisión bibliográfica realizada, permite establecer una serie de criterios a tener en cuenta:

- Lenguaje técnico simple, fácilmente comprensible.
- Información relevante para el proceso de diseño.
- Herramienta simple.
- Rapidez de uso.
- Herramienta de código abierto.
- Debe contener ejemplos de aplicación y casos de éxito.
- Aspectos en los que el usuario puede influir (y decidir).
- Énfasis en estrategias de fabricación.
- Cuestiones de salud y seguridad.
- Indicaciones sobre las posibilidades de utilizar materiales más sostenibles.
- Estrategias de ahorro de material y energía.
- Considerar la posibilidad de reparación de piezas.

Al examinar las sucesivas cuestiones que orientarán el proceso de selección, deberían tenerse en cuenta los aspectos anteriores centrados en las particularidades de la tecnología específica con la que se pretende trabajar. Las tecnologías de FA más accesibles son las que emplean materiales poliméricos; siendo las tecnologías basadas en el uso de metal más costosas y de uso reducido, generalmente a las grandes empresas o centros tecnológicos, siendo prácticamente inaccesibles para el usuario medio. Sin embargo, debido al elevado consumo de energía de estos sistemas y a los altos niveles de exigencia de los materiales utilizados, sería de gran interés realizar también un análisis del comportamiento ambiental de los mismos, que serviría de base para la elaboración de directrices específicas para mejorar la huella ambiental de dichas tecnologías.

REFERENCIAS

1. Karlsson R, Luttropp C. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. J Clean Prod. 2006;14(15-16):1291-1298. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2005.11.010
2. Chun YY, Lee KM, Lee JSJY, et al. Identifying key components of products based on consumer- and producer-oriented ecodesign indices considering environmental impacts, costs, and utility value. J Clean Prod. 2018;198:1031-1043. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2018.07.035
3. Santolaria M, Oliver-Sol J, Gasol CM, Morales-Pinzón T, Rieradevall J. Eco-design in innovation driven companies: Perception, predictions and the main drivers of integration. the Spanish example. J Clean Prod. 2011;19(12):1315-1323. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2011.03.009
4. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Bus Horiz. 2017;60(5):677-688. https://doi.org.com/10.1016/j.bushor.2017.05.011
5. Griffiths CA, Howarth J, De Almeida-Rowbotham G, Rees A, Kerton R. A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. J Clean Prod. 2016;139:74-85. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2016.07.182
6. Song R, Clemon L, Telenko C. Uncertainty and Variability of Energy and Material Use by Fused Deposition Modeling Printers in Makerspaces. J Ind Ecol. May 2018. https://doi.org.com/10.1111/jiec.12772
7. Paris H, Mokhtarian H, Coatanéa E, Museau M, Ituarte IF. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. CIRP Ann - Manuf Technol. 2016;65(1):29-32. https://doi.org.com/10.1016/j.cirp.2016.04.036
8. Tang Y, Mak K, Zhao YF. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing. J Clean Prod. 2016;137:1560-1572. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2016.06.037
9. Sierra-Pérez J, Domínguez M, Espinosa M del M. El ecodiseño en el ámbito de la ingeniería del diseño - Jorge Sierra-Pérez , Manuel Domínguez , Maria del Mar Espinosa - tecnicaindustrial.es. Técnica Ind. 2014;308. http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-5409-el-ecodiseno-ambito-ingenieria-diseno.aspx. Accessed May 18, 2019.
10. ISO 14040:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. 2006. https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es. Accessed June 13, 2019.
11. SimaPro. SimaPro - Lavola. https://www.lavola.com/es/simapro/. Accessed June 15, 2019.
12. Thinkstep. Life Cycle Assessment LCA Software: GaBi Software. https://www.gabi-software.com/spain/index/. Published 2016. Accessed June 15, 2019.
13. Simpple. LCAmanager. https://www.simpple.com/es/productes/lcamanager/. Accessed June 15, 2019.
14. PWC. TEAMTM 5.2 - Life Cycle Assessment (LCA) software. https://ecobilan.pwc.fr/en/boite-a-outils/team.html. Accessed June 15, 2019.
15. Rossi M, Germani M, Zamagni A. Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. J Clean Prod. 2016;129:361-373. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2016.04.051
16. Lofthouse V. Ecodesign tools for designers: defining the requirements. J Clean Prod. 2006;14(15-16):1386-1395. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2005.11.013
17. Lofthouse V, Bhamra PT, Cooper PR. Design for Sustainability: A Practical Approach. Ashgate Publishing Limited; 2012. https://books.google.es/books?id=Am3zicVWIhoC.
18. Buchert T, Kaluza A, Halstenberg FA, Lindow K, Hayka H, Stark R. Enabling product development engineers to select and combine methods for sustainable design. Procedia CIRP. 2014;15:413-418. https://doi.org.com/10.1016/j.procir.2014.06.025
19. Rousseaux P, Gremy-Gros C, Bonnin M, et al. "Eco-tool-seeker"A new and unique business guide for choosing ecodesign tools. J Clean Prod. 2017;151:546-577. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2017.03.089
20. Eco-tool-seeker - Pôle Eco conception. Pôle éco - conception. https://www.eco-conception.fr/static/eco-tool-seeker.html. Accessed July 8, 2019.
21. Diegel O, Singamneni S, Reay S, Withell A. Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing. J Sustain Dev. 2014;3(3). https://doi.org.com/10.5539/jsd.v3n3p68
22. Despeisse M, Ford S. The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. In: IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol 460. Springer, Cham; 2015:129-136. https://doi.org.com/10.1007/978-3-319-22759-7_15
23. Laverne F, Bottacini E, Segonds F, Perry N, D'Antonio G, Chiabert P. TEAM: A Tool for Eco Additive Manufacturing to Optimize Environmental Impact in Early Design Stages. In: IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol 540. Springer, Cham; 2018:736-746. https://doi.org.com/10.1007/978-3-030-01614-2_67
24. Mani M, Lyons KW, Gupta SK. Sustainability Characterization for Additive Manufacturing. J Res Natl Inst Stand Technol. 2014;119:419-428. https://doi.org.com/10.6028/jres.119.016
25. Peng T, Kellens K, Tang R, Chen C, Chen G. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. Addit Manuf. 2018;21:694-704. https://doi.org.com/10.1016/j.addma.2018.04.022
26. Van Wijk AJM, Van Wijk I. 3D Printing with Biomaterials : Towards a Sustainable and Circular Economy. IOS Press, Incorporated; 2015. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tEAoBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=3d+printing+sustainability&ots=nLGTF5pU-c&sig=Zy_Y3Dl2M651ax2GSY2ASH2kbYI#v=onepage&q=3d.
27. Bonvoisin J. Limits of ecodesign: the case for open source product development. Int J Sustain Eng. 2017;10(4-5):198-206. https://doi.org.com/10.1080/19397038.2017.1317875
28. Despeisse M, Baumers M, Brown P, et al. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. Technol Forecast Soc Change. 2017;115:75-84. https://doi.org.com/10.1016/j.techfore.2016.09.021
29. Kellens K, Baumers M, Gutowski TG, Flanagan W, Lifset R, Duflou JR. Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications. J Ind Ecol. 2017;21(S1):S49--S68. https://doi.org.com/10.1111/jiec.12629
30. Ford S, Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. J Clean Prod. 2016;137:1573-1587. https://doi.org.com/10.1016/j.jclepro.2016.04.150
31. Baumers M, Duflou JR, Flanagan W, Gutowski TG, Kellens K, Lifset R. Charting the Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing. J Ind Ecol. 2017;21(S1):S9--S14. https://doi.org.com/10.1111/jiec.12668
32. Bours J, Adzima B, Gladwin S, Cabral J, Mau S. Addressing Hazardous Implications of Additive Manufacturing: Complementing Life Cycle Assessment with a Framework for Evaluating Direct Human Health and Environmental Impacts. J Ind Ecol. 2017;21(S1):S25--S36. https://doi.org.com/10.1111/jiec.12587
33. Bourhis F Le, Kerbrat O, Dembinski L, Hascoet JY, Mognol P. Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process. In: Procedia CIRP. Vol 15. Elsevier; 2014:26-31. https://doi.org.com/10.1016/j.procir.2014.06.031
34. Sreenivasan R, Goel A, Bourell DL. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. Phys Procedia. 2010;5:81-90. https://doi.org.com/10.1016/J.PHPRO.2010.08.124
35. Le Bourhis F, Kerbrat O, Hascoet JY, Mognol P. Sustainable manufacturing: Evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol. 2013;69(9-12):1927-1939. https://doi.org.com/10.1007/s00170-013-5151-2
36. Liu Z, Jiang Q, Zhang Y, Li T, Zhang H-C. Sustainability of 3D Printing: A Critical Review and Recommendations. In: Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing. ASME; 2016:V002T05A004. https://doi.org.com/10.1115/MSEC2016-8618
37. Peng T. Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes. In: Procedia CIRP. Vol 40. ; 2016:62-67. https://doi.org.com/10.1016/j.procir.2016.01.055

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a apoyo dado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en el marco del Proyecto 2020-ICF05.