

Beneficios y debilidades medioambientales de los procesos de fabricación aditiva en el sector empresarial. Agentes implicados en el impacto medioambiental del uso de tecnologías de fabricación digital

Environmental benefits and weaknesses of additive manufacturing processes in the business sector. Key players influencing the environmental impact of digital manufacturing technologies

■■■■
Naiara Uriarte-Gallastegi, Beñat Landeta-Manzano, Germán Arana-Landín e Iker Laskurain-Iturbe
Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9657>

El concepto de Industria 4.0 se basa en la integración de las tecnologías de la información y comunicación (TICs) y las tecnologías industriales. Depende principalmente de la creación de un sistema ciberfísico para realizar una fábrica digital e inteligente, el cual crea un modelo de producción altamente flexible de productos y servicios personalizados y digitales, con interacciones en tiempo real entre personas, productos y dispositivos durante el proceso de producción [1]. Las nuevas tecnologías englobadas en la Industria 4.0, como la fabricación aditiva (FA), están experimentando una rápida difusión. Concretamente, la producción de productos personalizados y de geometrías difícilmente replicables –mediante las tecnologías tradicionales de sustracción de material– son dos de las características de la FA destacadas en el estado del arte [2]. Estas características hacen de la FA una alternativa a los métodos de fabricación tradicionales con gran potencial de desarrollo. Las aplicaciones descritas de la FA son muy numerosas y aumentan día a día [2], no obstante, su aplicación en la industria está principalmente en fase experimental y se emplea fundamentalmente en el desarrollo de prototipos [3].

Por este motivo, quizá en parte, en la literatura se constata un déficit de estudios relacionadas con las implicaciones medioambientales de las tecnologías que abarcan la Industria 4.0, en general, y la FA en particular [5]. Los pocos estudios existentes no abordan el estudio del impacto potencial de la adopción de máquinas o sistemas de FA por parte de las empresas, sino que centran el foco en investigaciones de laboratorio [4]–[6]. La mayoría de los esfuerzos de inventario de ciclo de vida (LCI) se centran principalmente en el consumo de energía [5]–[6], y es que el consumo de energía determina en gran medida el impacto medioambiental en los análisis efectuados [7]–[8]. Concretamente, Kellens et al. [9] concluían que la energía específica de los sistemas FA actuales es de una a dos veces mayor en comparación con la de los procesos de fabricación convencionales de mecanizado y moldeo por inyección. Sin embargo, tanto en alta como en baja utilización, la tecnología Fused Deposition Modelling (FDM) de FA logra un impacto medioambiental más bajo por pieza. En la FA de productos metálicos, Serres et al. [9] afirmaban en su estudio que la tecnología de depositado mediante energía dirigida (*Laser cladding*) es mucho más respetuosa con el medio ambiente que el mecanizado convencional, aproximadamente un 70% inferior, y que el impacto se debía casi en un 90% al gasto energético por la elaboración de polvo metálico.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se planteó abordar el estudio exploratorio

del impacto medioambiental de las tecnologías de FA, con el desarrollo de casos que permitieran investigar en profundidad el fenómeno en un contexto real, y poder así identificar aspectos relevantes de desempeño ambiental no recogidos o estudiados suficientemente en la literatura. Con este objetivo, después de la presente introducción, se exponen los materiales y métodos de investigación. A continuación, se muestran los resultados obtenidos. Posteriormente, se describen las principales conclusiones y las propuestas de investigación que los autores entienden que pueden ser de interés en el ámbito académico, profesional y de decisores públicos.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha optado por una investigación basada en un estudio de casos múltiple, dado que las implicaciones medioambientales de la FA en el desempeño de las actividades de la empresa no han sido analizadas en profundidad. Siguiendo las recomendaciones metodológicas de la literatura [10], se seleccionaron 4 casos de fabricantes de equipos de FA con tecnología propia, 2 centrados en la fabricación con materiales plásticos y 2 con materiales metálicos. Además, se mantuvieron entrevistas con profesionales, investigadores, clientes, consultores y distribuidores, con objeto de identificar aspectos clave para el desarrollo de la investigación.

Inicialmente, se llevaron a cabo 9 entrevistas semi-estructuradas con personal técnico de diseño y desarrollo, de servicios de mantenimiento y reparación, de compras, de ventas, y de producción. Asimismo, se tuvo acceso a diversa documentación (memorias, documentación técnica, comunicaciones internas...) proporcionada por las propias empresas (triangulación de datos).

Posteriormente, se realizaron visitas a las plantas de fabricación para confirmar *in situ* datos obtenidos previamente y observar nuevas posibles evidencias (triangulación metodológica). Además, al final de estas entrevistas se les pidió que valorasen, utilizando una escala *Likert* de 1 a 5, su grado de conformidad con las principales afirmaciones recogidas en la literatura.

Finalizada la caracterización de los casos, se llevó a cabo el análisis individual y

el análisis cruzado del conjunto, que consistió en examinar, categorizar, tabular y examinar la evidencia recogida, tratando de identificar patrones comunes de comportamiento entre los casos, y determinar su conexión.

Posteriormente, con objeto de reforzar las conclusiones extraídas del estudio mediante grupo de expertos (triangulación teórica), se optó por compartir los resultados con cuatro expertos del área de conocimiento, y reforzar la validez constructiva de la investigación [10].

2. RESULTADOS

2.1. SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

Las 4 empresas se han denominado con nombres ficticios. Alpha y Beta tienen procesos de fabricación destinados a fabricar productos plásticos y Gamma y Delta productos metálicos.

La división de fabricación aditiva de Alpha nació en 2014 desarrollando prototipos de impresión en PLA (ácido poliláctico) mediante la tecnología FDM en un momento en que caducaban varias patentes de los líderes del mercado y líderes en tecnología, Stratasys y 3D Systems.

Por su parte, Beta se dedica fundamentalmente a las artes gráficas. Crearon una división de impresión 3D y las características de la FA les ha abierto un abanico de posibilidades en diferentes merca-

dos no previstos en su estrategia inicial. Actualmente emplean dos tecnologías de FA en polímeros, la tecnología FDM y la tecnología de inyección de material (Material Jetting) o PolyJet.

En relación a Gamma, la empresa se fundó a finales del año 2016. Comenzaron desarrollando una máquina basada en tecnología FDM, pero rápidamente abandonaron el proyecto por la fuerte competencia del mercado. Posteriormente, desarrollaron la que fue la primera máquina de SLM de España, con software de laminación propio.

Delta es el resultado de un proyecto de tres socios que contaban con una amplia trayectoria en tecnologías de sustracción tradicionales. Se consolidó en 2014 ofreciendo diseño y fabricación de piezas o componentes *ad hoc* a clientes industriales.

2.2. PRINCIPALES APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE FA A LA INDUSTRIA

Las 4 empresas coinciden en señalar que la FA es una tecnología que se encuentra en fase emergente con gran potencial de difusión. De ella destacan las siguientes aportaciones:

- Reducción de costes y tiempos en la fase de desarrollo de producto: Resulta especialmente competitivo en el prototipado rápido. Por ejemplo, un cliente de Alpha realiza "el desarrollo de distintos utillajes en la planta de

Volkswagen (Navarra). Se diseñan y se fabrican prototipos con tecnología FDM y, posteriormente, una vez acoradada la geometría, se fabrica el utillaje mediante métodos tradicionales sustractivos".

- Reducción de costes de fabricación de productos únicos o en series cortas: En Delta afirman que el sector de automoción se está transformando, "están apareciendo muchas piezas de moldes y de elementos muy complejos, que son de poca tirada, entre 10.000 y 50.000 unidades y, por tanto, ideales para hacer en máquinas de FA con tecnología SLM". Otro ejemplo es la fabricación de útiles con aplicación directa, el producto fabricado mediante la tecnología FDM es el producto final, sin necesidad, en muchos casos, de procesos de mecanizado.
- Reducción del número de componentes y simplificación del proceso de fabricación y montaje de productos multicomponente: En Gamma señalan que "Airbus está haciendo unos inyectores con todas las piezas ensambladas directamente, en una sola pieza, de forma que se puede reducir el tamaño del inyector y reducir de forma drástica el consumo de combustible". Sin embargo, en Delta afirmaban que "aún se encuentra muy lejos del grado de experimentación de otras industrias".
- Capacidad para replicar formas complejas, texturas y comportamiento

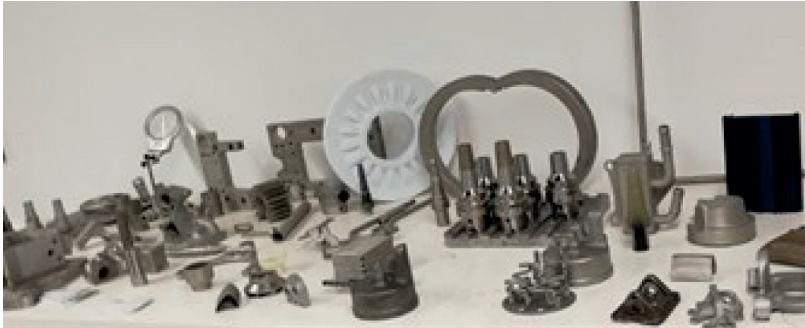


Figura 1: Piezas de geometría compleja fabricados por Delta mediante SLM

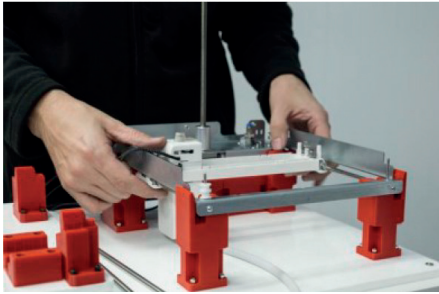


Figura 2. Utillaje de producción para línea de montaje fabricado por Alpha mediante la técnica FDM

EMPRESA	FACTURACIÓN*	APLICACIÓN: SECTOR	TIPO	TECNOLOGÍA	MATERIALES
Delta	149	Prototipado rápido: automoción, utillaje de fabricación	Fabricación directa con polvo predepositado	SLM	Metales y aleaciones en forma de polvo: Aceros inoxidables, aceros herramienta, aleaciones base Ni, aleaciones Ti y Al, aleaciones Co-Cr, bronce y metales preciosos
Gamma	253	Reproducción de modelos reales: educación.			
Alpha	3.894	Prototipado rápido: Automoción Reproducción de modelos reales: educación	Extrusión	FDM	Termoplásticos (PLA, ABS, etc.), productos comestibles
Beta	6.233	Prototipado rápido: marketing Reproducción de modelos reales: educación, biosanitario, joyería			
			Impresión	Material jetting	Ceras, fotopolímeros o metales

Nota: * Datos del ejercicio 2019 en miles de €.
 Tabla 1: Tecnologías de FA analizadas en los casos

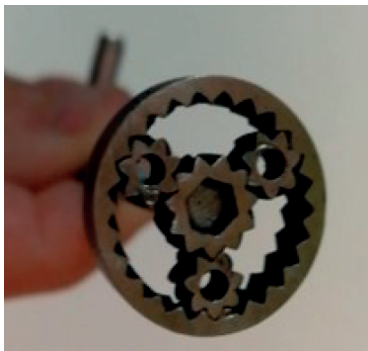


Figura 3. Muestra de un mecanismo fabricado por Gamma mediante SLM

mecánico: Desde Beta destacaban que una buena parte de sus clientes, principalmente en bisutería, requieren réplicas precisas de objetos ya existentes para lo cual emplean la tecnología PolyJet o FDM. Además, Beta está apostando por el desarrollo de aplicaciones biosanitarias. Están desarrollando modelos anatómicos, simulando formas, texturas y otras propiedades como la elasticidad y resistencia al corte destinados a fines docentes y al ensayo de intervenciones de equipos médicos.

- Reproducción de modelos reales con fines educativos: la tecnología PolyJet en procesos de formación del ámbito biosanitario y la demanda de máquinas de FA de tecnología FDM en el sector educativo son destacables. En Alpha, incluso proponen "un kit de robótica educativa para niños y niñas, de forma que aprendan a programar con bloques visuales llamado "bitblog" y creen robots".

2.3. ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

Pese a las consecuencias medioambientales, los clientes habitualmente trabajan entre "el compromiso de la calidad y el tiempo de producción". La magnitud de estos impactos depende de muchas variables como son la tecnología empleada, la dimensión de las piezas, los materiales utilizados y el tamaño de lote.

2.3.1. Fabricación aditiva de productos plásticos

En Alpha señalan que la tecnología FDM ofrece importantes reducciones de impacto medioambiental con respecto a la fabricación mediante métodos tradicionales sustractivos "fundamentalmente por el ahorro en material". Sin embargo, el tipo de material condiciona en gran medida el nivel impacto medioambiental del producto que se fabrica. Algunas máquinas permiten trabajar con éxito en PLA, ABS, y PETG (PET, PETT). Concretamente, en el desarrollo de útiles para cubrir las necesidades de la planta emplean PLA de fabricación propia. En Alpha y Beta destacan que el propio consumo material de extrusión PLA es también un aspecto relevante del impacto medioambiental. Por un lado, el consumo de las materias primas para su uso en fabricación implica el empleo de campos de cultivo para producir la principal materia prima del PLA, el maíz. En la actualidad se necesitan 2,65kg de maíz para hacer 1 kg de PLA. Por otro lado, en Beta añaden que, a pesar de que el PLA sea un material biodegradable, "resulta muy difícil su reutilización, su conversión en grano y posterior procesamiento para crear un nuevo filamento para ser extruido", según Alpha, y confirmado por el experto 1. Otros materiales, como el ABS, tienen varios inconvenientes desde el punto de vista medioambiental; ya que se obtiene a partir de sustancias derivadas del petróleo y tiene un origen no renovable, aunque se puede recuperar y reciclar. En Alemania, por ejemplo, el propio fabricante del filamento debe recuperar los residuos, procesarlos y, en su caso, crear nuevo filamento, tal y como relata el experto 2. En España no hay una regulación que obligue a ello.

Sin embargo, el desarrollo de mejoras de la tecnología FDM está fuertemente condicionado por las patentes en vigor que dificultan la implementación de ciertas soluciones técnicas de mejora. Por ejemplo, en palabras de Alpha, "el sistema

de control de la temperatura de la cámara de impresión de Stratasys, puede suponer una pequeña revolución en estas impresoras. Este control posibilitará que se puedan imprimir piezas con diferentes formas y ángulos que ahora mismo no se pueden realizar" e incluso mejorar la calidad del acabado del producto.

En relación a la tecnología PolyJet, en el estudio de patologías concretas de casos reales y ensayo de intervenciones quirúrgicas, en Beta creen que "será posible reducir notablemente la utilización de cadáveres o partes de los mismos". El experto 3 apunta; que la gestión del cadáver desde la donación para la ciencia, su utilización total y su gestión posterior, conllevan un impacto medioambiental importante, que en muchos casos podría ser evitable.

En cualquier caso, resulta muy difícil estimar el impacto medioambiental del uso de esta tecnología, principalmente, porque los productos pueden ser fabricados con una mezcla de varios tipos de resinas, materiales de nueva formulación ("materiales digitales") pero de composición desconocida y, por tanto, los productos fabricados con tecnología PolyJet no se pueden reciclar. Por este motivo, al final de la vida útil del producto, actualmente la opción más segura del residuo es su vertido controlado y/o su valorización energética, lo que impide la mejora del comportamiento medioambiental de esta tecnología de fabricación.

Un aspecto clave en el impacto medioambiental de los productos es su vida útil. Beta y los expertos 2 y 3 afirman que "los materiales son todos fotopolímeros de diversa composición y los productos finales son también sensibles a la luz, lo que puede hacer cambiar sus propiedades con el tiempo" y, por ende, reducir su vida útil.

Por último, en la tabla 2, se advierte que los procesos de FA no requieren un incremento del consumo energético relevante comparado con los procesos tradicionales, no al menos en series cortas (refrendado por los expertos 2 y 3), donde la FA es potencialmente competitiva.

2.3.2. Fabricación aditiva de productos metálicos

Gamma y Delta coinciden en afirmar que los principales consumos del proceso de fabricación son el propio material en polvo del que se compone la pieza a fabricar, la energía eléctrica del proceso y el gas contenido en la cámara para crear una atmósfera inerte. El polvo metálico sobrante es tamizado y recuperado de la cuba.

Desempeño medioambiental	Grado de conformidad	
	Alpha	Beta
Mayor demanda de energía específica	1	2
Mayor impacto ambiental de la etapa de fabricación	1	1
Mayor necesidad de estructuras de apoyo	5	4
Menor producción de residuos	3	3
Mayor eficiencia de los materiales	4	5
Mejora de operaciones de re-procesado	3	4
Reducción de peso del producto	5	5

Nota: 1 totalmente en desacuerdo – 5 totalmente de acuerdo.
Tabla 2. Beneficios y debilidades de los procesos de FA de productos plásticos en comparación con los procesos de fabricación convencionales

La principal ventaja desde el punto de vista medioambiental es la utilización de materia prima en cantidad prácticamente igual al peso del producto (menor a 1%, según Delta) (ver Tabla 3). Se logran unas propiedades mecánicas ligeramente inferiores a las obtenidas por forja, pero superiores a las obtenidas por otros métodos de producción tradicionales. Y en el caso de productos obtenidos de componentes

tas, con un servicio personalizado y rápido, logrando un ahorro de costes y tiempos principalmente en la fase de desarrollo de producto. El aumento del consumo energético es un aspecto destacado en la literatura. Sin embargo, ni las empresas participantes en el estudio ni los expertos consultados lo confirman. Sin embargo, este aspecto no ha podido ser contrastado estadísticamente. Por otro lado, en el

Desempeño medioambiental	Grado de conformidad	
	Gamma	Delta
Mayor demanda de energía específica	2	1
Mayor impacto ambiental de la etapa de fabricación	4	1
Necesidad de estructuras de apoyo	2	5
Menor producción de residuos	4	5
Mayor eficiencia de los materiales	4	5
Mejora de operaciones de re-procesado	4	5
Reducción de peso del producto	4	5

Nota: 1 totalmente en desacuerdo – 5 totalmente de acuerdo.
Tabla 3: Beneficios y debilidades medioambientales de los procesos de FA de productos metálicos en comparación con los procesos de fabricación convencionales

ensamblados, además, se evitan los impactos derivados de las operaciones de ensamblado.
El acabado de las piezas creadas mediante la tecnología SLM es superior al logrado mediante la tecnología Laser Material Deposition (LMD). Sin embargo, el proceso implica mantener una cámara inerte con gas argón o nitrógeno que, si bien la emisión del mismo a la atmósfera implica un impacto medioambiental insignificante, su obtención tiene un impacto no despreciable. En ambas tecnologías “la obtención de material metálico en polvo supone el principal impacto medioambiental del proceso”, en palabras del experto 4.

3. CONCLUSIONES

La diversidad de tecnologías en diferentes estadios en el proceso de diseño y desarrollo de aplicaciones en la industria dificulta la evaluación del impacto medioambiental y, por ende, comparar el desempeño medioambiental de la FA con las tecnologías de fabricación sustractivas. Uno de los aspectos no recogidos en la literatura y destacado en la investigación es el bajo nivel de ruido generado por la FA, pudiendo incluso integrar la FA en entornos en el que se desarrollan tareas de concentración media-alta como el propio diseño de producto.
La FA da respuesta a una producción flexible que permite fabricar en series cor-

estudio se ha comprobado que las tecnologías de FA permiten obtener una mayor eficiencia en el consumo de materiales frente a los procesos de fabricación mediante tecnologías sustractivas tradicionales. No obstante, en la fabricación aditiva se emplean normalmente materiales de soporte que deben ser retirados y son otra fuente de impacto como residuo material, y en el caso de los productos plásticos, también por los procesos necesarios para su retirada.
En relación a las líneas futuras de investigación, a partir de los resultados de la investigación, se propone aplicar metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para analizar el impacto medioambiental de productos fabricados mediante distintas tecnologías de FA y compararlo con las tecnologías tradicionales de fabricación. Aún entonces no será posible la generalización de los resultados, pero sí se dará la posibilidad de conocer la causa de los impactos más relevantes de las técnicas de FA y poder así diseñar estrategias medioambientales.

REFERENCIAS

[1] Kagermann, H, Wahlster, W, Helbig, J. "Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie". National Academy of Science and Engineering. April 2013. Vol. 4-0.
[2] Attaran, M. "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over

traditional manufacturing". Business Horizons. 2017. Vol. 60-5, p. 677-688.
[3] Kamble, SS, Gunasekaran, A, Gawankar, SA. "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives". Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 117, p. 408-425.
[4] Ford, S, Despeisse, M. "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges". Journal of Cleaner Production, 2016. Vol. 137, p. 1573-1587.
[5] Rejeski, D, Zhao, F, Huang, Y. "Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing". Additive Manufacturing. 2018. Vol. 19, p. 21-28.
[6] Kellens, K, Mertens, R, Paraskevas, D, et al. "Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?". Procedia CIRP. 2017. Vol. 61, p. 582-587.
[7] Faludi, J, Bayley, C, Bhogal, S, Iribarne, M. "Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment". Rapid Prototyping Journal. 2015. Vol. 21-1, p.14-33.
[8] Kellens, K, Baumer, M, Gutowski, T G, Flanagan, W, Lifset, R, Dufflou, J R. "Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications". Journal of Industrial Ecology. 2017. Vol. 21-S1, p. S49-S68.
[9] Serres, N, Tidu, D, Sankare, S, Hlawka, F. "Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment". Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19, no 9-10, p. 1117-1124.
[10] Yin, RK. "Case study research and applications: Design and methods". Thousand Oaks, CA: Sage publications. 2017.

AGRADECIMIENTOS

Este documento es parte del trabajo del Grupo de Investigación del Sistema Universitario Vasco financiado por el Gobierno Vasco GIC IT1073-16. No existe relación alguna entre los autores y las empresas, aparte de los contactos estrictamente necesarios para llevar a cabo la investigación. Ni el grupo de investigación ni la Universidad del País Vasco, a la que pertenecen los autores, ha recibido directa o indirectamente fondos de las empresas. El estudio se ha realizado con fines puramente académicos.