



Identificación digital de piezas de alto valor añadido

Aizpea Urresti¹, Jon Iñaki Arrizubieta¹, Aitzol Lamikiz¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain
aizpea.urresti@ehu.eus

La compra-venta de falsificaciones de piezas de alto valor añadido es un problema creciente en la actualidad. Esta situación es especialmente crítica para las tecnologías de fabricación aditiva (FA), que posibilitan la fabricación de cualquier componente digitalizado. La identificación de piezas legítimas se ha convertido en una prioridad, ya que el empleo de piezas no reguladas puede acarrear graves consecuencias en aplicaciones como el sector sanitario o la aeronáutica.

En el presente trabajo se analizan diferentes vías para la identificación de componentes de alto valor añadido del sector aeronáutico. Tras un análisis de la literatura, se ha concluido que la dificultad de falsificación, la permanencia, la facilidad de identificación y el mínimo efecto en la pieza base son las principales características a tener en cuenta al diseñar un método válido. En base a estos requisitos, la inclusión de un identificador embebido dentro de la pieza e invisible a simple vista se ha seleccionado como el método más viable. Con el objetivo de localizar los identificadores dentro de las piezas, se estudian los principales métodos de análisis no destructivos, y su compatibilidad con los diferentes métodos de identificación.

Tras realizar el análisis de compatibilidad se determina que el aporte directo de energía mediante laser (DED-LB) es una tecnología adecuada para formación de características identificables, debido a la posibilidad de generar estructuras de densidad o composición variable, y que los rayos X son la tecnología de análisis más compatible con ella. Finalmente, se presenta la metodología propuesta detallando los pasos a seguir en cada una de las fases de fabricación, y sus posibles aplicaciones en la industria aeronáutica.

1. Introducción

La compra-venta de falsificaciones de piezas de alto valor añadido es un problema creciente en la actualidad, afectando diversas industrias que dependen de la autenticidad y calidad de los componentes utilizados en sus productos [1]. Este fenómeno es aún más crítico cuando se trata de tecnologías avanzadas, como la Fabricación Aditiva Metálica (FAM), que ha revolucionado la manera en que se producen los componentes en diversas áreas. La FAM permite crear cualquier tipo de pieza a partir de un diseño digitalizado, lo que brinda una gran flexibilidad y eficiencia [2], pero también abre la puerta a la proliferación de piezas no certificadas o falsificadas.

En este contexto, la identificación de piezas se ha convertido en una prioridad de primer orden [3], ya que el empleo de componentes no regulados y que pueden ser de mala calidad puede acarrear consecuencias graves, especialmente en sectores donde el aseguramiento de la seguridad es un factor clave, como es el caso de la aeronáutica [4]. Las piezas falsas o defectuosas no solo ponen en riesgo la integridad de las aeronaves y la seguridad de los pasajeros, sino que también afectan la fiabilidad de los sistemas tecnológicos en otros sectores, como la medicina, la ferroviaria o la automoción [5]. Además, el impacto de la falsificación de piezas no se limita únicamente a la seguridad, sino que también tiene implicaciones económicas significativas. Por un lado, está el impacto directo derivado de las pérdidas generadas por la venta de piezas fraudulentas en vez de componentes legítimos, a lo que hay que sumar el impacto que acarrea reemplazar piezas defectuosas o fraudulentas, lo que puede generar costos elevados para las empresas [6].

En muchos casos, la falsificación de piezas ocurre de manera clandestina, lo que hace aún más complejo el seguimiento y control de la cadena de suministro. La falta de trazabilidad y control sobre las piezas fabricadas mediante impresión 3D, dificultan la identificación de productos fraudulentos y aumentan los riesgos asociados a su uso. Al permitir la fabricación descentralizada y la distribución de diseños a través de plataformas en línea, es más difícil verificar la autenticidad de las piezas que se producen en diferentes ubicaciones y por distintos proveedores [7], lo que agrava aún más el problema existente.

Por todo ello, es esencial que se implementen medidas eficaces para mitigar los riesgos asociados a la falsificación de piezas. Esto incluye el desarrollo de tecnologías de verificación que permitan garantizar la autenticidad de las piezas producidas tanto mediante métodos tradicionales como aquellos más novedosos como la FAM. No obstante, en la actualidad no se dispone de ningún proceso consolidado para la identificación de piezas de alto valor añadido, debido a que no existe ningún método adecuado para responder a las necesidades nacidas de las propiedades de cada pieza.

En este trabajo se presenta una propuesta de metodología para la identificación de la legitimidad de piezas metálicas de alto valor añadido. Para ello, en primer lugar se ha realizado un análisis de los principales requisitos de este tipo de marcas de identificación. Por otro lado, se estudian las tecnologías con mayor potencial para la fabricación de identificadores, debido a su flexibilidad en cuanto a dimensiones de pieza y tamaños de código. Los métodos de lectura de identificadores se basan en los principales métodos no destructivos ya existentes, los cuales permiten analizar la pieza sin dañar su integridad. Las posibles combinaciones entre los métodos de fabricación y lectura de identificadores se estudian mediante un análisis de viabilidad y, según los resultados obtenidos, se describe el método propuesto para la identificación de componentes de alto valor añadido.

2. Planteamiento del problema

La preparación de un método para identificar piezas de alto valor añadido es una labor complicada. Primeramente, se han de definir los requisitos propios para la identificación de piezas y aquellos que proceden de la aplicación concreta. En segundo lugar, y atendiendo a las necesidades previamente identificadas, se analizan los posibles métodos para la lectura del identificador en piezas de alto valor añadido y los procesos de fabricación que puedan producir identificadores legibles mediante alguno de los métodos analizados.

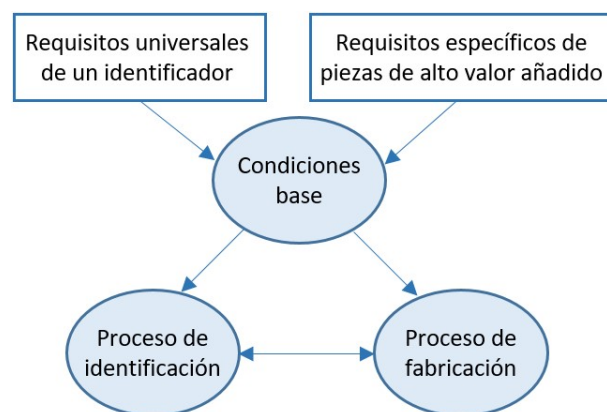


Figura 1: Aspectos clave a considerar en la generación de códigos para identificación digital de componentes.

Los métodos de lectura considerados provienen de ensayos no destructivos para el análisis de piezas, ya que la integridad de éstas es crítica para su posterior desempeño y se busca un sistema de análisis que permita analizar el 100% de las piezas en caso de ser necesario.

2.1. Requisitos del identificador

Un primer paso en la búsqueda de una metodología para la identificación de piezas de alto valor añadido es establecer cuáles son los requisitos de partida para lograr esta marcación. Se parte de la base que se debe tratar de un método sencillo, rápido, pero que permita evitar su falsificación. En el siguiente apartado se identifican las necesidades universales de un identificador funcional, además de condiciones adicionales que se corresponden al caso de piezas de alto valor añadido.

En primer lugar, un método de identificación de piezas debe ser imposible de replicar, de lo contrario su empleo sería superfluo. La forma más fácil de evitar la réplica de un identificador es esconder su existencia, puesto que cualquier identificador conocido es más susceptible de poder imitarse. Este requisito plantea la necesidad de emplear un **identificador invisible a simple vista**, ya sea mediante el uso de tinta invisible en la superficie o empleando distintas técnicas para embeber el identificador dentro de la misma pieza.

Por otro lado, la **individualidad o dificultad de réplica** es una característica deseable en el identificador, ya que funcionaría como seguridad adicional en caso de que la existencia de este sea descubierta [8]. Sin embargo, el seguimiento de identificadores individuales supone una dificultad a la hora de obtener información sobre la pieza, como su número de serie, origen, etc. Esta información es más fácilmente resumible en un código, lo que establece la necesidad de flexibilidad en el proceso de fabricar los identificadores.

Otro elemento a tener en cuenta es la **permanencia del identificador** en la pieza, ya que las piezas originales deben poder ser identificadas durante toda su vida útil. Este aspecto es clave cuando se tiene en cuenta que en diferentes sectores industriales, incluyendo el aeronáutico, las piezas se fabrican en empresas especializadas y han de ser trasladadas para su ensamble, lo que podría dañar un identificador. Además, estos componentes pueden sufrir tratamientos posteriores o incluso las propias condiciones de trabajo durante su uso también podrían dañar el identificador.

El proceso de identificación de piezas ha de ser lo suficientemente sencillo para poder realizarse en diferentes fases desde su fabricación al final de su vida útil. Por lo tanto, la **sencillez y rapidez de lectura** del identificador es otro elemento a tener en cuenta a la hora de establecer un método de codificación.

En último lugar, la inclusión del identificador o el proceso de lectura de este no deben influir en el comportamiento de la pieza a lo largo de su vida útil. Especialmente en el contexto de piezas de alto valor añadido, la **integridad estructural** ha de mantenerse en las zonas críticas y la superficie de las piezas no debe dañarse, ya que podría originar grietas. Esta condición ha de tenerse en cuenta especialmente a la hora de escoger el proceso de fabricación y posición del identificador en la pieza. En la Tabla 1 se resumen los requisitos de los identificadores para cada una de las características deseadas.

Tabla 1: Resumen de los requisitos de los identificadores.

Características	Requisitos
Detección	Invisible a simple vista
Unicidad	Individualidad o dificultad de réplica
Durabilidad	Permanencia del identificador durante la vida útil
Lectura	Sencilla y rápida
Propiedades	No debe afectar a las propiedades del componente (integridad estructural)

2.2. Procesos de identificación

Una vez establecidos los requisitos base para la codificación de piezas de alto valor añadido, es necesario seleccionar un método de lectura que se ajuste a estos. A continuación, se presentan los principales métodos empleados para la lectura de identificadores, que se basan en los utilizados para ensayos no destructivos de la Figura 2 y se resumen en la Tabla 2.

En primer lugar, la luz ultravioleta es comúnmente empleada en el análisis de líquidos penetrantes, pues revela patrones o imágenes donde se detecta la presencia de este líquido. Aunque su uso es simple y efectivo, el método obligaría a que el identificador se coloque en la superficie de la pieza y pueda ser impregnado por los líquidos, lo que lo hace susceptible a su falsificación o eliminación.

En segundo lugar, el análisis electromagnético emplea una corriente eléctrica o un campo magnético para analizar las propiedades de piezas. Es un método usado comúnmente en industrias como la aeronáutica, automovilística y

naval para analizar la calidad de piezas de alto valor añadido. Sin embargo, su uso está limitado a materiales conductores.

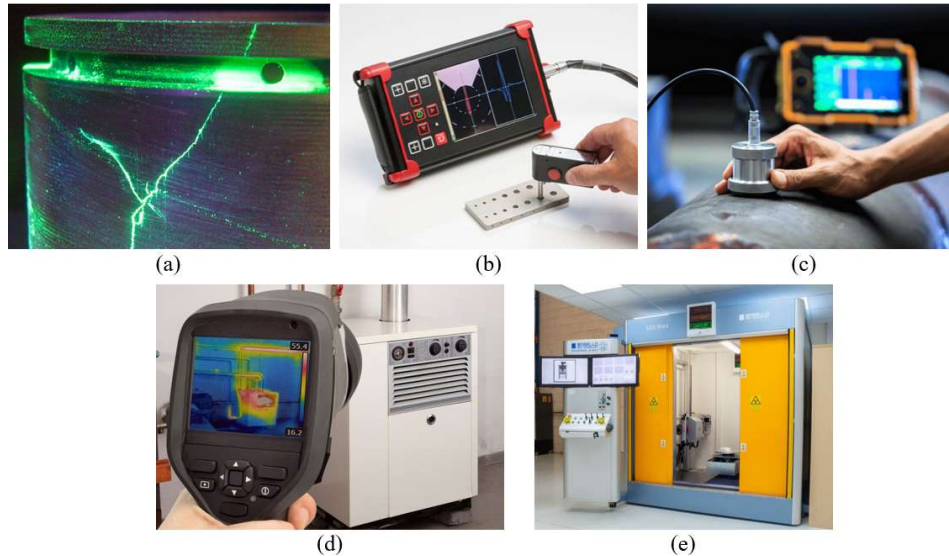


Figura 2: Ejemplos de los métodos de lectura de identificadores: (a) luz ultravioleta [9] , (b) análisis electromagnético [10], (c) análisis de emisiones acústicas [11], (d) análisis térmico y (e) rayos X.

El tercer método está basado en el análisis de emisiones acústicas o ultrasonidos, siendo estos empleados mayoritariamente para la detección de discontinuidades o defectos en una pieza mediante el envío de ráfagas cortas de ultrasonidos. Estos podrían aplicarse para posicionar identificadores colocados dentro de piezas, pero es muy complejo obtener una señal con resolución suficiente y que permita leer un código determinado.

El análisis térmico se realiza forzando un gradiente de temperatura en una pieza, y observando la distribución de temperatura en su superficie mediante sensores de longitud de onda. Este método permite identificar discontinuidades o defectos bajo la superficie de la pieza, aunque la profundidad de estos tiene un límite, por lo que la resolución de medida queda también limitada.

Finalmente, el empleo de rayos X está creciendo en la industria, ya que permite obtener imágenes de la geometría interna de piezas, haciendo que las áreas densas claras y las menos densas más oscuras. El empleo de esta tecnología permite observar discontinuidades o defectos a cualquier profundidad, siempre y cuando las características de la máquina sean suficientes para analizar una pieza de dichas dimensiones.

Tabla 2: Resumen de los métodos de identificación.

Método	Ventaja	Desventaja
Luz ultravioleta	Barato y rápido	Solo detecta patrones superficiales
Análisis electromagnético	Ampliamente empleado en sectores como aeronáutico	Solo apto para materiales conductivos
Emisiones acústicas o ultrasonidos	Barato y permite embeber un código dentro de la pieza	Lectura lenta y requiere contacto. Codificación y penetración limitadas
Análisis térmico	Rápido y permite códigos 2D	Código cercano a la superficie
Rayos X	Permite ver códigos complejos y alejados de la superficie	Requiere una mayor inversión inicial

2.3. Proceso de fabricación

Debido a la flexibilidad presentada por los procesos láser, los cuales se muestran en la Figura 3, estos métodos se han tomado como base a la hora de analizar procesos para su posible aplicación en fabricar identificadores en piezas de alto valor añadido.

Una de las soluciones posibles es emplear directamente el proceso de fabricación de las piezas para incorporar elementos identificadores en ellas. La mayoría de componentes de alto valor añadido fabricados por FAM provienen de la **fusión en lecho de polvo mediante láser**, o **PBF-LB**, donde la pieza se fabrica capa a capa en una cámara inerte, véase la Figura 3(a). En este caso, una de las opciones es crear zonas sin fusión donde la densidad y distribución de calor sean menores. De esta manera, la zona del identificador podría leerse mediante el análisis térmico, ultrasonidos o rayos X. No obstante, a no ser que se diseñen canales de evacuación, lo que afectaría al acabado superficial del componente, las subsecuentes capas atrapan el polvo dentro de la pieza. Este hecho introduce un ruido en la señal medida que dificulta la lectura del código.

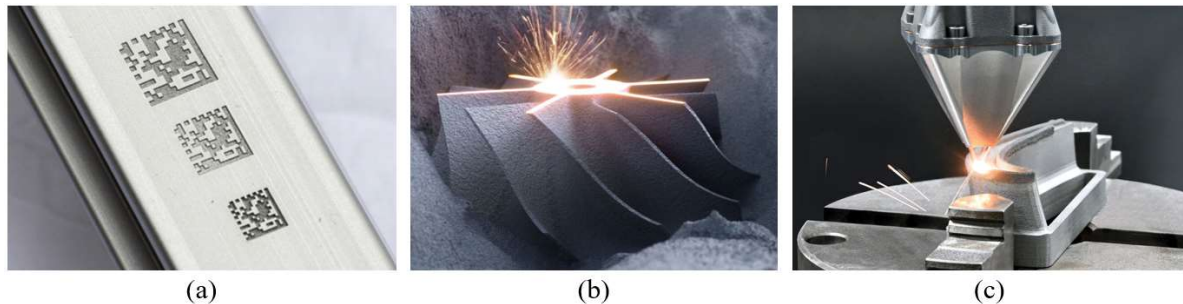


Figura 3: Imágenes de los procesos de (a) fusión de lecho de polvo mediante láser (PBF-LB) [12], (b) marcado láser [13], y (c) aporte dirigido de energía mediante láser (DED-LB)[14].

El **marcado por láser** es un método empleado para fabricar grabados de diferentes características en superficies de piezas. Aunque existan diferentes métodos para la creación de grabados, como la electroerosión por penetración o el marcado electroquímico, el marcado láser permite cambiar fácilmente la estructura o dimensiones de la imagen a grabar. Esta flexibilidad es clave a la hora de aplicarse a piezas con números de serie u otros elementos cambiantes, en donde el marcado es prácticamente unitario.

Aunque el grabado es un proceso superficial, y por lo tanto visible a simple vista, los identificadores grabados podrían ser cubiertos posteriormente mediante **aporte directo de energía por láser o DED-LB** para ocultar su presencia. Por lo tanto, el identificador resultante podría leerse mediante análisis electromagnético, acústico y térmico o por rayos X. Sin embargo, la resolución de la lectura empeoraría significativamente, ya que espacio vacío entre el grabado y el recubrimiento es limitado, como consecuencia de los problemas que tienen los procesos de FAM para trabajar en vacío.

Por último, el **DED-LB por sí solo** es una tecnología apropiada para la fabricación de identificadores, debido su capacidad de generar componentes multilaterales que permiten la inclusión de materiales de distintas propiedades (densidad, conductividad térmica o conductividad eléctrica entre otros). El material añadido se puede seleccionar en base a la mejor combinación con el material base, y según el tipo de tecnología seleccionada para la lectura del código. Por un lado, combinaciones en las que hay una diferencia de densidad significativa, se pueden emplear los rayos X para leer el código a cualquier profundidad. Por otro lado, si el material escogido tiene diferentes propiedades, el análisis electromagnético o el magnetismo local pueden ser mejores opciones. Como aspecto negativo, cabe destacarse que los componentes fabricados mediante DED-LB presenta una menor resolución espacial que los de LPF-LB o los texturizados por láser, lo que podría limitar la información máxima a codificar o podría incrementar el tamaño del código a embeber.

Tabla 3: Resumen de los procesos de fabricación láser para la generación de códigos de identificación.

Tecnología	Aplicación	Limitación
PBF-LB	Códigos embebidos basados en cavidades internas	El polvo de fabricación queda atrapado en su interior
Marcado láser	Texturizado flexible de códigos 2D	Identificación superficial
Marcado láser + DED-LB	Texturizado de códigos y posterior recubrimientos para ocultarlo	Resolución de lectura limitado
DED-LB multimaterial	Códigos internos en base a las diferencias de propiedades de los materiales	Menor resolución de código

3. Resultados

3.1. Análisis de viabilidad

Basado en el análisis presentado en la sección anterior, y tras estudiar los trabajos relacionados de la literatura, se plantean las siguientes posibles combinaciones de tecnologías para la fabricación y lectura de identificadores en piezas de alto valor añadido.

- **Marcado de la superficie de la pieza y recubrimiento mediante capa fina de DED-LB.** Este tipo de identificador podría ser leído mediante un análisis electromagnético, acústico y térmico o por rayos X, lo que otorga gran flexibilidad en ese aspecto. Sin embargo, las señales extraídas por los métodos de lectura electromagnético y acústico son de tipo lineal, lo que obliga a realizar múltiples medidas para obtener una lectura 2D, con el consiguiente incremento del tiempo de lectura que ello conllevaría. El análisis térmico solventaría este problema ya que permite analizar una superficie completa. No obstante, obligaría a colocar el identificador cerca de la superficie y en estudios previos se ha concluido que a medida que se incrementa la profundidad a la que se encuentra el código su lectura pierde precisión [15], por lo que

no se considera un método adecuado más allá de introducir un logo o marca simple en ciertas zonas de un componente.

- **Fabricación de piezas de PBF-LB con huecos sin fundir** para generar zonas de menor densidad y distribución de calor. El identificador resultante podría leerse mediante análisis térmico o rayos X [16]. Al igual que en el caso previo, el análisis térmico establece la necesidad de posicionar el identificador cerca de la superficie, mientras los rayos X ofrecen flexibilidad en ese aspecto. Sin embargo, este método de fabricación limita la resolución en ambas lecturas debido a la presencia de polvo atrapado en las zonas sin fundir [17]. Además, este método está limitado a piezas fabricadas por PBF-LB y posteriores a la integración del método, lo que imposibilita su uso en piezas fabricadas mediante otros procesos o piezas de PBF-LB que se hayan fabricado previamente.
- **Impresión y recubrimiento de identificadores multimateriales mediante DED-LB**, los cuales podrían leerse por distintos medios según el material utilizado. El empleo de materiales ferromagnéticos dentro de piezas no magnéticas permite identificar la pieza empleando el análisis electromagnético o localización directa mediante polvo magnético [18]. Sin embargo, este último método pierde resolución conforme se aumenta la profundidad del identificador. En su lugar, el empleo de materiales de densidad significativamente diferente al del material base, permite la lectura por rayos X del identificador a cualquier profundidad.

Tabla 4: Resumen de las posibles combinaciones de tecnologías para la fabricación y lectura de identificadores.

Fabricación	Método de identificación	Flexibilidad	Resolución código	Profundidad lectura
Marcado + DED-LB	Electromagnético, acústico, térmico o rayos X	Sí	Baja	Baja
Marcado + DED-LB	Rayos X	Sí	Media	Cualquiera
PBF-LB	Térmico, acústico	No	Baja	Bajo [16]
PBF-LB	Rayos X	No	Baja	Cualquiera [16]
DED-LB	Análisis de magnetismo	Sí	Media	Bajo [18]
DED-LB	Rayos X	Sí	Alta	Cualquiera

Como se observa en el resumen de la Tabla 4, los procesos de marcado laser y DED-LB ofrecen la mayor flexibilidad a la hora de crear identificadores, al poder emplearse en piezas de cualquier origen y fecha de fabricación. Por otro lado, en lo que a la resolución se refiere, el uso del DED-LB multimaterial obtendría mejores resultados que la generación de grabados, debido a que el posterior recubrimiento no afecta directamente a las propiedades del identificador.

Finalmente, en lo referente a la profundidad del identificador el análisis muestra que la lectura mediante rayos X ofrece la mayor libertad, puesto que el resultado es independiente de la profundidad. Este factor es de vital importancia a la hora de escoger un método de lectura, debido a la necesidad de mantener las propiedades mecánicas de la pieza base. En base a todas las observaciones se deduce que el empleo de DED-LB multimaterial con materiales de distinta densidad y posterior lectura mediante rayos X es la combinación más prometedora.

3.2. Descripción del método propuesto

Una vez se han estudiado las diferentes combinaciones de fabricación y lectura de los códigos, se concluye que la mejor alternativa es el empleo de DED-LB multimaterial y su posterior identificación mediante rayos X. Por ello, en el presente apartado se presenta la metodología propuesta para la impresión y recubrimiento de identificadores multimaterial en DED-LB, detallando los pasos a seguir en cada una de las fases de fabricación (Figura 4), y sus posibles aplicaciones en la industria aeronáutica.

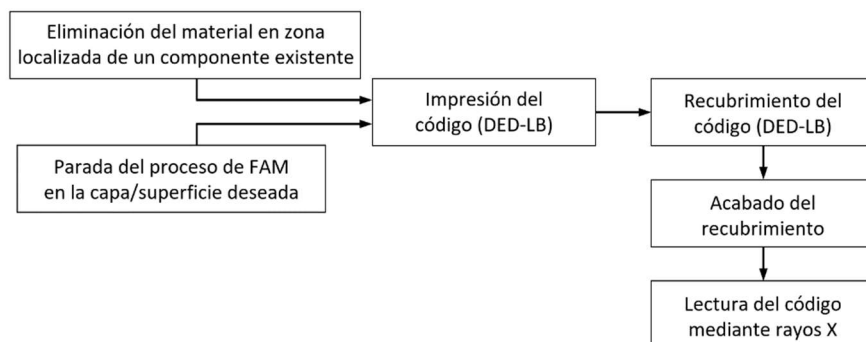


Figura 4: Esquema del proceso de fabricación mediante DED-LB y lectura del código mediante rayos-X.

El primer paso es el análisis del diseño original con el objetivo de localizar las zonas más tensionadas. De esta manera se podrá colocar el identificador lo más alejado posible de estas zonas, reduciendo su posible influencia en el comportamiento de la pieza.

Una vez realizado este análisis se procede a fabricar la pieza, atendiendo a la posición que tomará el identificador. Si la pieza a identificar es fabricada mediante de FAM, es posible incorporar una zona plana a la profundidad deseada en el diseño 3D. En caso contrario, el diseño seleccionado se mecanizará en la pieza ya fabricada, para ser acabada posteriormente.

Seguidamente se procederá a la impresión del identificador mediante DED-LB empleando un material con una densidad diferente a la de la pieza base (por ejemplo, una mayor densidad). La impresión generará zonas discretas de mayor densidad en la pieza, que observadas mediante rayos X permitirá ver el patrón del código. Tras imprimir el identificador, éste se cubre con el mismo material de la pieza base, para ocultar cualquier rastro del código. Este proceso se describe en la Figura 5.

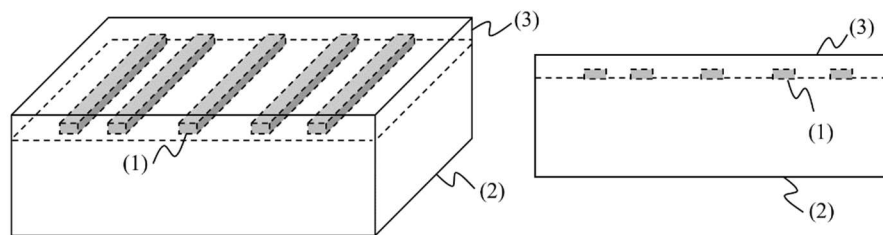


Figura 5: Ejemplo del posicionamiento de un código (1) sobre el material base (2) y posterior recubrimiento (3) con el mismo material que la base.

Finalmente, se realizan las operaciones de acabado de la pieza, por ejemplo, mediante mecanizado, lo que hará que la zona recubierta sea indistinguible a simple vista de la pieza original. En la Figura 6 se muestra a modo de ejemplo un álabe codificado, donde el código se posicionaría en la base.

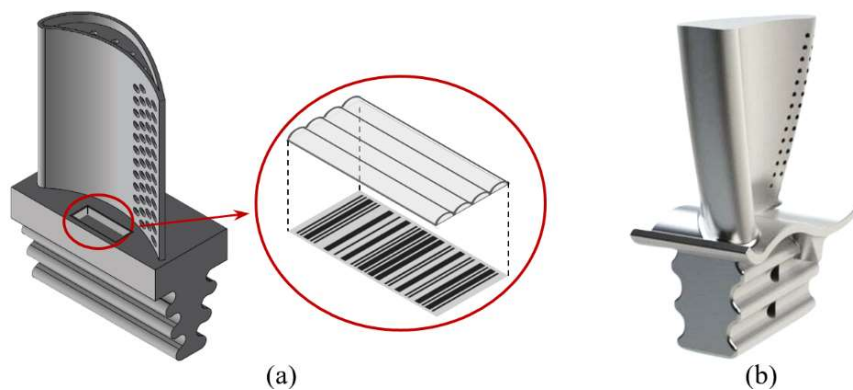


Figura 6: (a) Diseño CAD de la pieza de alto valor añadido preparada para la impresión y recubrimiento de un identificador mediante DED-LB y (b) pieza final tras el proceso de impresión e operaciones de acabado.

Una vez acabada, la pieza podrá ser identificada mediante rayos-X a lo largo de toda su vida útil. No obstante, para que dicha identificación sea posible, las partes interesadas deberán conocer la posición del identificador y colocar la pieza adecuadamente dentro de la máquina.

4. Conclusiones

En el presente trabajo han estudiado los diferentes aspectos a tener en cuenta a la hora de identificar digitalmente piezas de alto valor añadido. En primer lugar, se han planteado los requisitos necesarios para obtener un identificador permanente, único e indetectable a simple vista. Además, se han analizado los posibles métodos para lectura de los identificadores, teniendo en cuenta las limitaciones individuales y posibles combinaciones entre métodos. Por último, se han estudiado las principales ventajas y limitaciones que presentan los diferentes procesos de fabricación a la hora de generar estos identificadores. La consideración conjunta de estos tres aspectos clave ha permitido elegir la mejor alternativa para generar código embebidos que permitan identificar componentes metálicos de manera permanente, indetectable e inequívoca.

El método seleccionado se basa en el aporte multimaterial mediante aporte directo de energía por láser o DED-LB. Este método permite fabricar un código empleando un material distinto al de la pieza base, que posteriormente se oculta con el material de base para hacer que su inclusión resulte invisible a simple vista desde el exterior. De esta manera, el código fabricado es legible únicamente mediante rayos X.

Es importante resaltar que para la lectura del código embebido mediante rayos X es necesaria asegurar una correcta orientación de la pieza y que el código esté posicionado en una zona donde se pueda obtener una lectura clara.

Esta información es conocida por el fabricante del componente, que lo puede compartir con sus clientes de cara a asegurar la originalidad de sus componentes y evitar falsificaciones.

Asimismo, es recomendable que el código esté posicionado en zonas donde el componente no vaya a estar sometida a elevadas sollicitaciones mecánicas durante su vida útil, aunque a este respecto habría que realizar una caracterización de la influencia que tiene la inclusión del código en la durabilidad y comportamiento del componente, siendo este una línea de trabajo que queda abierta a futuras investigaciones.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda PID2022-141946OB-C21 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por ERDF A way of making Europe, además del Gobierno Vasco por su apoyo a los grupos de investigación de la Universidad, IT1573-22.

Referencias

- [1] Europol. Counterfeiting and product piracy. Disponible online en: <https://www.europol.europa.eu/crime-areas-and-statistics/crime-areas/intellectual-property-crime/counterfeiting-and-product-piracy>
- [2] K. Balasubramanian, V. Senthilkumar, D. Senthilvel. Introduction to Additive Manufacturing (2020), Additive Manufacturing Applications for Metals and Composites (pp. 1-24). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4054-1.ch001>
- [3] R. Schuitemaker, X. Xu. Product traceability in manufacturing: a technical review, *Procedia CIRP* 93 (2020) 700–705, <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.04.078>.
- [4] Marin, I., Rusu, M., Soare, V., Tonoiu, S., & Blăjină, O. (2022). Considerations regarding the risk of using counterfeit products in the aerospace industry. *INCAS BULLETIN* 14. DOI: 10.13111/2066-8201.2022.14.4.17
- [5] Lu, D., et al. Towards Privacy-Aware Traceability for Automotive Supply-Chains (2021).
- [6] Buttice, V., Caviggioli, F., Franzoni, C., Scellato, G., Strykowski, P.K., & Thumm, N. (2020). Counterfeiting in digital technologies: An empirical analysis of the economic performance and innovative activities of affected companies. *Research Policy*.
- [7] Montero, J., Weber, S., Bleckmann, M., Atzberger, A., Wirths, L., & Paetzold, K. (2019). Spare part production in remote locations through Additive Manufacturing enhanced by agile development principles. 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 1-8.
- [8] Z. Quan, Q. Zhang, H. Li, S. Sun, and Y. Xu, Fluorescent cellulose-based materials for information encryption and anti-counterfeiting, *Coord. Chem. Rev.* 493 (2023) 215287, doi: 10.1016/J.CCR.2023.215287.
- [9] AQGNDT [Online]. Disponible: <https://aqgndt.com/how-does-fluorescent-penetrant-inspection-work/>
- [10] One stop NDT [Online]. Disponible: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/electromagnetic-testing-types>
- [11] NDT kits [Online]. Disponible: <https://ndt-kits.com/ultrasonic-testing/>
- [12] 3DNatives.com [Online]. Disponible: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>
- [13] Lintech.cz [Online]. Disponible: <https://www.lintech.cz/en/products/laser-technology/laser-applications/laser-engraving/>
- [14] Prima additive [Online]. Disponible: <https://www.primaadditive.com/en/technologies/direct-energy-deposition?>
- [15] Tabatabaei, N. (2018). Matched-Filter Thermography. *Appl. Sci.*, 8, 581. <https://doi.org/10.3390/AP8040581>
- [16] F. Chen, J. Zabalza, P. Murray, S. Marshall, J. Yu, N. Gupta, Embedded product authentication codes in additive manufactured parts: imaging and image processing for improved scan ability, *Addit. Manuf.* 35 (2020) 101319, <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101319>.
- [17] C. Wei, Z. Sun, Y. Huang, and L. Li, “Embedding anti-counterfeiting features in metallic components via multiple material additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 24, pp. 1–12, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.09.003.
- [18] D. Salas, D. Ebeperi, M. Elverud, R. Arróyave, R. J. Malak, and I. Karaman, Embedding hidden information in additively manufactured metals via magnetic property grading for traceability, *Addit. Manuf.* 60 (2022) 103261, doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.103261.