

03-001

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SELECTING THE OPTIMAL TECHNOLOGY IN ADDITIVE METAL MANUFACTURING USING AN ANALYTICAL HIERARCHICAL PROCESS (AHP)

Uralde Jiménez, Virginia ⁽¹⁾; Akordagoitia Gurrutxaga, Maider ⁽¹⁾; Veiga Suárez, Fernando ⁽¹⁾; Suárez González, Alfredo ⁽²⁾; Ballesteros Egües, Tomás ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Pública de Navarra, ⁽²⁾ ADDILAN

Additive manufacturing has experienced a remarkable growth in recent years thanks, among other things, to the wide range of technologies, materials and equipment that can be used. Given the complexity of selecting a technology and considering as a starting hypothesis that there is no universally applicable technology that is optimal for all materials, sizes and shapes, a method based on multi-criteria selection has been developed that aims to select the best alternative for the additive manufacturing of metal parts. Using the analytical hierarchical process (AHP), different technologies (alternatives) have been analysed and compared and the criteria (those characteristics and/or attributes that identify each alternative) have been defined. The importance of each criterion analysed in the hierarchy matrix was determined based on expert surveys. The innovation of this work is that a pre-selection criterion excluding alternatives has been considered in order to select the optimum technology oriented to the specific application, being able to define the part in more detail in terms of shape, material and size. Finally, the application of the AHP method identifies the highest scoring alternatives, providing a useful selection tool for users.

Keywords: Analytic Hierarchy Process; AHP; Multi-criteria decision-making; Metal Additive Manufacturing; 3D Printing

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA SELECCIONAR LA TECNOLOGÍA ÓPTIMA EN FABRICACIÓN ADITIVA DE METALES MEDIANTE UN PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

La fabricación aditiva ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años gracias, entre otras cosas, a la amplia oferta de tecnologías, materiales y equipos que pueden utilizarse. Dada la complejidad de seleccionar una tecnología y teniendo en cuenta como hipótesis de partida que no existe una tecnológica de aplicación universal que sea óptima para todos los materiales, tamaños y formas; se ha desarrollado un método basado en la toma de selección multicriterio que pretende seleccionar la mejor alternativa de fabricación aditiva de piezas metálicas. Con el proceso analítico jerárquico (AHP) se han analizado y comparado diferentes tecnologías (alternativas) y se han definido los criterios (aquellas características y/o atributos que identifiquen cada alternativa). La importancia de cada criterio analizado en la matriz de jerarquía se ha determinado en base a encuestas realizadas a expertos. La novedad de este trabajo es que se ha considerado un criterio de preselección excluyente de alternativas para poder seleccionar la tecnología óptima orientada a la aplicación concreta pudiendo definir más en detalle la pieza en forma, material y tamaño. Finalmente, la aplicación del método AHP identifica las alternativas con mayor puntuación, proporcionando una útil herramienta de selección para los usuarios.

Palabras clave: Proceso de jerarquía analítica; AHP; toma de decisiones multicriterio; fabricación aditiva de metales; impresión 3D



1. Introducción

Hasta ahora, las técnicas sustractivas convencionales fabrican piezas partiendo de un bloque sólido, extrayendo el material necesario hasta obtener la geometría deseada. En cambio, las tecnologías clasificadas como de fabricación aditiva añaden o funden el material sólo donde es necesario.

La fabricación aditiva (FA) es una técnica que consiste en construir objetos tridimensionales capa por capa a partir de un modelo digital. Se pueden utilizar una amplia variedad de materiales, dependiendo de la tecnología específica utilizada (Jandyal et al., 2022; Pratheesh Kumar et al., 2021). Esta técnica presenta una serie de ventajas frente a otro tipo de fabricaciones; ya que tiene la capacidad de producir piezas geoméricamente complejas que, de otro modo, serían imposibles de fabricar; como pueden ser piezas huecas o piezas con detalles o entramados internos complejos. Por lo que la fabricación aditiva proporciona una gran libertad de diseño, que es vital, por ejemplo, para las aplicaciones que requieren una reducción de peso. Esta reducción puede lograrse mediante la optimización topológica del diseño (Zhu et al., 2021), añadiendo entramados internos (en lugar de tener piezas sólidas) o pudiendo fabricar en una sola pieza que con las técnicas tradicionales requeriría tener que fabricar un conjunto de varias piezas.

La personalización de la pieza también se está convirtiendo en un valor al alza y por lo tanto en otra ventaja de esta técnica (Tofail et al., 2018), ya que, con las técnicas de fabricación tradicionales, la personalización de piezas está limitada por el coste y esto es debido en gran medida a la necesidad de un utillaje único y complejo que requiere de largas tiradas y compromete la personalización a un determinado coste y MOQ (Minimum Order Quantity). Del mismo modo, dado que la FA se utiliza para producir piezas directamente a partir del diseño asistido por ordenador (CAD), la producción de piezas únicas y personalizadas es factible incluso sin la necesidad de un utillaje (Satish Prakash et al., 2018).

Otra gran ventaja de esta técnica es la reducción de la materia prima utilizada, al ser una técnica aditiva y no sustractiva, permite reducir sustancialmente el coste de la pieza a fabricar (Uralde et al., 2022a). De este modo, las tecnologías aditivas producen una pieza con una geometría casi final (considerada como un proceso de forma casi neta) con una tasa de utilización de la materia prima muy alta. En este contexto, se introduce el término Fabricación Híbrida, que se refiere a los procesos de fabricación basados en la combinación de procesos aditivos y tradicionales (comúnmente, procesos de mecanizado) para fabricar piezas que son difíciles (o incluso imposibles) de obtener por cada uno de los procesos por separado. Además, mediante esta hibridación, se pueden superar las limitaciones de los procesos aditivos relacionadas con la baja productividad, la calidad superficial rugosa y la falta de precisión dimensional (Pragana et al., 2021). En la actualidad, la fabricación aditiva puede generar piezas de densidad total en una amplia gama de materiales, como polímeros (Veiga et al., 2022), metales (Uralde et al., 2022b), cerámica (Zhang et al., 2020), materiales compuestos (Parandoush and Lin, 2017), etc. La fabricación aditiva de materiales poliméricos ha sido probablemente la más estudiada, gracias a las bajas temperaturas de procesamiento y fusión de este tipo de materiales y al hecho de que no necesitan ni gases de protección ni atmósferas protegidas para su procesamiento. Por el contrario, las temperaturas de fusión de los materiales metálicos y cerámicos son más altas, por lo que no son tan fáciles de procesar (Tofail et al., 2018).

Aun así, la fabricación aditiva de estos materiales está ganando mucho interés en los últimos tiempos. Además, las tecnologías aditivas también dan la opción de generar piezas multimateriales, es decir, piezas compuestas por más de un material, lo que no era posible hasta ahora con las técnicas de fabricación tradicionales (Uralde et al., 2022a).

Dada la rápida evolución de estas tecnologías y su amplio portfolio de técnicas, muchos recursos en el diseño de la industria se han visto obligados a modificar su sistema y flujo para adaptarse al entorno de la FA (Harata and Odake, 2023; Klahn et al., 2018). Un claro ejemplo son los programas de CAD/CAM para la creación de piezas en 3D. Estos programas permiten crear la pieza resultante, sin necesidad de partir de un bruto, pudiendo diseñar con una precisión y un nivel de detalle que se ajustan a las especificaciones de las piezas. Como parte importante estos programas ofrecen herramientas para optimizar topológicamente la pieza, pudiendo reducir peso y material sin comprometer la resistencia o funcionalidad de la pieza (Tyflopoulos and Steinert, 2022). Punto clave en este tipo de técnicas, puesto que la versatilidad que ofrecen a la hora de diseñar hacen que esta función sea de gran ayuda (Veiga et al., 2021).

Estos programas CAD están integrados con softwares de impresión 3D, lo que facilita la transferencia del diseño del software CAD al software de preparación y control de la impresión. Simplificando el proceso de fabricación y garantizando una comunicación fluida entre el diseño y la impresión. Algunos de los programas que integran un módulo específico y han adaptado sus funcionalidades son: Autodesk Fusion 360 e Inventor, SolidWorks, Siemens NX o PTC Creo.

A día de hoy estos programas no son capaces de orientar al usuario en la recomendación de la técnica de impresión más apropiada para la pieza diseñada, creando una línea de trabajo aun sin desarrollar.

1.1 Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva de metales

Dentro de la fabricación aditiva, cada tipo de tecnología consiste en una combinación particular de una fuente de energía, un formato de material de relleno y una cinemática específica de la máquina, lo que hace que cada una sea adecuada para una aplicación determinada, como puede verse en la Tabla 1. Según la terminología estándar creada por la ASTM (ASTM52900-21), las tecnologías de fabricación aditiva se clasifican en siete categorías (Karlsson et al., 2019), siendo las cinco primeras las más habituales para la fabricación de componentes en materiales metálicos (Kunchala and Kappagantula, 2018):

1. Fusión de lecho de polvo (Power Bed Fusion, PBF)
2. Proyección de aglutinante (Binder Jetting, BJT)
3. Laminado de hojas (Sheet Lamination, SHL)
4. Deposición de energía focalizada (Directed Energy Deposition, DED)
5. Extrusión de material (Material Extrusion, MEX)
6. Proyección de material (Material Jetting, MJT)
7. Fotopolimerización en tanque o cuba (Vat PhotoPolymerization, VPP)

Cuando se trata de materiales metálicos, existe una gran variedad de técnicas de fabricación tradicionales. Entre las más comunes están la fundición, la forja y el mecanizado, y éstas siguen siendo los pilares de la industria del metal en todo el mundo. En cambio, la fabricación aditiva en estos materiales es relativamente nueva (década de 1980) y ofrece una serie de técnicas automatizadas basadas en la producción por capas. Inicialmente, la fabricación aditiva en metales sólo se desarrolló para la creación rápida de prototipos; sin embargo, estas técnicas aditivas están siendo impulsadas por la demanda de fabricación de componentes reales de ingeniería para volúmenes bajos y medios y con características medioambientales y económicas mejoradas.

Estos nuevos procesos permiten un gran ahorro de material y energía, reduciendo el coste y el impacto medioambiental de la fabricación de diversos componentes. Además, estas

técnicas pueden utilizarse para fabricar piezas con geometrías complejas (que no son posibles con las técnicas de fabricación tradicionales) e incluso para reparar piezas de alto valor añadido. De este modo, se pueden obtener piezas con una gran precisión geométrica manteniendo las propiedades mecánicas adecuadas.

Tabla 1: Resumen de las tecnologías de fabricación aditiva según ventajas y limitaciones.(Uralde et al., 2022b)

	Ventajas	Limitaciones
Fusión de lecho de polvo (PBF)	Geometrías complejas, sin retirada de soportes, amplia gama de materiales	Relativamente caro y complejo, limitación de tamaño
Proyección de aglutinante (BJ)	Rápido y limpio, sin grandes inversiones, bajas distorsiones,	Propiedades del material relativamente débiles
Laminado de hojas (SL)	Alta velocidad, bajo coste relativo	Materiales limitados, geometrías impresas limitadas
Deposición de energía focalizada (DED)	Gran tamaño de fabricación y alta velocidad de producción	Material limitado debido a las propiedades metalúrgicas
Extrusión de material (ME)	Mantenimiento y coste de material baratos	Proceso lento, difícil de fabricar piezas complejas, baja precisión. Post-procesado
Proyección de material (MJ)	Piezas metálicas de alta densidad, fácil desmontaje de las estructuras de soporte	Tamaño limitado, material limitado a utilizar
Fotopolimerización en tanque o cuba (VPP)	Acabado superficial y precisión, imprime geometrías complejas	Proceso de impresión lento. Coste del material relativamente alto, material limitado a utilizar

Al examinar las posibilidades y limitaciones de estas tecnologías, se concluye que los diferentes métodos de fabricación aditiva de metales tienen muchos retos que superar en un futuro próximo. Por ello, la selección de uno de ellos para realizar una pieza en concreto, se puede ver dificultada por la cantidad de factores que intervienen en estas tecnologías.

Esta selección no depende de un criterio único, como puede ser el coste de la pieza, por ejemplo. Existen otras variables o criterios a tener en consideración igualmente importantes para un usuario a la hora de seleccionar la técnica como puede ser la productividad por hora, la precisión de la técnica, el acabado, la complejidad geométrica...etc.

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico en la vida real, dado que hay muchas situaciones que involucran, de un modo u otro, la evaluación de distintas alternativas en base a un conjunto de criterios de decisión que suelen estar en conflicto entre sí (Sánchez, 2001). Consecuentemente, es importante contar con herramientas que permitan tomar la mejor decisión dentro de un conjunto de posibles alternativas, permitiendo un análisis científico/matemático de la situación (Saaty, 1987).

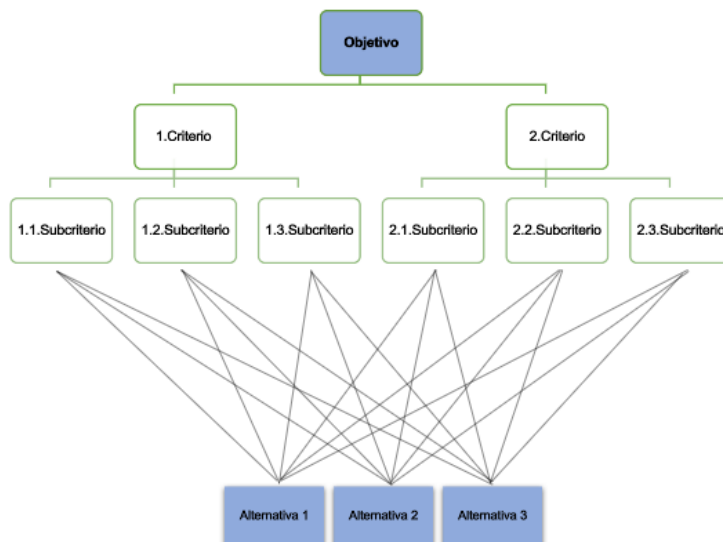
1.3 AHP fundamentos

El análisis multicriterio más común es el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), propuesto por Saaty (Saaty, 1990, 1987). AHP ha sido ampliamente utilizado en los campos empresarial, industrial, gubernamental y de gestión (Ariff et al., 2012).

La aplicación del AHP comienza con la descomposición de un problema en una jerarquía de criterios para que sea más fácil analizarlo y compararlo de forma independiente como se muestra en la Figura 1. Una vez construida esta jerarquía lógica, los responsables de la toma de decisiones pueden evaluar sistemáticamente las alternativas realizando comparaciones

por pares para cada uno de los criterios elegidos. Esta comparación puede utilizar datos concretos de las alternativas o juicios humanos como forma de introducir información subyacente (Saaty, 2008).

Figura 1: Ejemplo de jerarquía para el proceso AHP



El AHP transforma las comparaciones, que suelen ser empíricas, en valores numéricos que se procesan y comparan posteriormente. El peso de cada factor permite evaluar cada uno de los elementos dentro de la jerarquía definida. Esta capacidad de convertir los datos empíricos en modelos matemáticos es la principal aportación distintiva de la técnica AHP cuando se contrasta con otras técnicas de comparación.

En esta herramienta de análisis dos elementos pueden compararse de diversas formas (Triantaphyllou and Mann, 1995) La escala más popular es la propuesta por Saaty para comparar la importancia relativa de dos alternativas. La escala de 1 a 9 asigna valores que determinan la importancia relativa de una alternativa en comparación con otra, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Escala de importancia relativa de Saaty (Saaty, 2008)

Escala de preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderada y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igual y moderadamente preferible	2
Igualmente, preferible	1

Es habitual utilizar siempre los números impares de la tabla anterior para asegurarse de que existe una distinción razonable entre los puntos de medición.

Una vez realizadas todas las comparaciones y establecidos los pesos relativos entre cada uno de los criterios a evaluar, se calcula la preferencia de cada alternativa. Esta preferencia determina la probabilidad que tiene la alternativa de cumplir el objetivo esperado. Cuanto mayor sea la probabilidad, más posibilidades tendrá la alternativa de satisfacer el objetivo final. El cálculo matemático que implica el proceso AHP puede parecer sencillo en un principio, pero cuando se trata de casos más complejos, los análisis y cálculos se vuelven más profundos y exhaustivos.

Se ha observado que esta metodología es útil en el campo de la fabricación para la compra de diferentes técnicas de fabricación, la selección de una tecnología de fabricación óptima y para la selección de la mejor tecnología de fabricación (Schuhmann et al., 2022) ya que permite evaluar y comparar diferentes opciones basándose en múltiples criterios importantes como el coste, la calidad, la fiabilidad, la productividad... etc.

En los últimos años, se han estudiado diferentes enfoques de esta metodología en el campo de la fabricación aditiva. Comparando la FA con los procesos convencionales de una forma más general, o centrándose en el análisis de una tecnología específica (M.B. and S., 2018), analizando la optimización en particular de las piezas que se van a fabricar mediante FA (Ghuge et al., 2022) o incluso una clasificación de la aplicación de los factores que intervienen en la fabricación aditiva (Sonar et al., 2021). Hasta la fecha, no se ha estudiado ningún enfoque que pretenda comparar técnicas de fabricación aditiva de piezas metálicas con la novedad de que la comparación se adapta a las características que el usuario busca para su pieza, limitando la selección a un criterio que excluye alternativas basado en tres factores que se desarrollan a lo largo del estudio.

Este trabajo tiene por objetivo aplicar un método de selección multicriterio en la selección de la tecnología óptima para la fabricación de piezas metálicas mediante fabricación aditiva. La propuesta busca analizar y comparar diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Estas se definirán como alternativas, mientras que los criterios serán aquellas características y/o atributos que identifiquen cada alternativa. La aplicación del AHP ayudará a optimizar la selección identificando la mejor alternativa en base a los criterios definidos.

La novedad es que se ha considerado un criterio de preselección excluyente de alternativas para poder seleccionar la tecnología óptima orientada a la aplicación concreta pudiendo definir más en detalle la pieza en forma, material y tamaño. Teniendo en cuenta como hipótesis de partida que no existe una tecnológica de fabricación aditiva de aplicación universal que sea óptima para todos los materiales, tamaños y formas.

Los hitos/objetivos del estudio han sido:

- Realizar un benchmarking sobre los procesos de fabricación aditiva en metales, para determinar las alternativas que evaluar para fabricar hoy en día piezas metálicas.
- Identificar los criterios en base al proceso de fabricación aditiva y caracterizarlos para posteriormente, evaluarlos según el método AHP
- Determinar en base a encuestas, el grado de preferencia que tienen los expertos sobre distintos criterios y alternativas con el fin de determinar su nivel de prioridad en la matriz de importancia global.

2. Metodología

Para buscar la tecnología de fabricación aditiva de metales más óptima se ha utilizado un método de decisión multicriterio (AHP) que nos ayuda a seleccionar entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección que suelen entrar en conflicto entre sí. La estructura jerárquica utilizada de arriba a abajo sería: objetivo final, criterios y finalmente las alternativas a comparar.

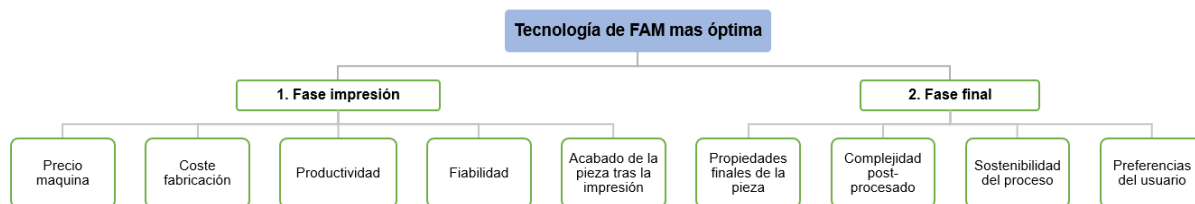
Uno de los aspectos fundamentales del método es elegir criterios y subcriterios de selección apropiados, definiéndolos correctamente y asegurando que sean mutuamente excluyentes. En cada nivel de la jerarquía se realizan comparaciones entre pares de elementos del mismo nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades de dichos elementos. Las comparaciones por pares se realizan por medio de niveles de preferencia (si se comparan alternativas) o niveles de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el método, que emplea valores de 1 a 9 para calificar la preferencia relativa entre dos elementos.

Los siguientes subapartados presentan el procedimiento seguido para definir criterios y alternativas.

2.1 Selección de criterios

El primer paso para realizar la matriz AHP es definir los criterios con los que evaluar posteriormente las alternativas. Se han propuesto dos criterios de primer nivel y nueve subcriterios; todos en base al proceso y flujo de trabajo de la fabricación aditiva (diseño, impresión y acabado o fase final). El primer nivel atiende a las fases del proceso y el segundo nivel a los factores que intervienen en dicha fase. Los criterios propuestos y su jerarquía se muestran en la Figura 2 y la ponderación de su importancia dentro de la matriz se ha evaluado mediante encuestas a expertos, clientes y diseñadores de fabricación aditiva metálica.

Figura 2: Estructura jerárquica para los criterios de selección en base al flujo de trabajo de FA



1. Fase de impresión. Se define como la fase en la que intervienen factores o etapas como, el coste de la máquina, el coste de la fabricación, la productividad, la fiabilidad del proceso y el acabado de la pieza tras la impresión y todos ellos componen este primer criterio.

- Precio máquina (PM). Coste de adquisición de la maquinaria necesaria para la fabricación de piezas en la tecnología.
- Coste fabricación (CF). Costes asociados a la fabricación de la pieza en bruto impresa (considerando: coste de los materiales, mano de obra (recurso humano) y otros costes indirectos asociados (energía eléctrica, alquiler...).
- Productividad (P). Considerando la productividad como material impreso/hora.
- Fiabilidad (F). Capacidad de fabricación de piezas en aditivo sin ocurrencia de defectuosos o inactividades asociadas a fallas.
- Acabado de la pieza tras la impresión (AP). Grado de acabado (ondulación más rugosidad) que presentan las piezas después de terminado de la pieza en bruto impresa.

2. Fase final. Se define como la fase en la que intervienen factores o etapas como, las propiedades finales de la pieza, complejidad del pros-procesado, la sostenibilidad del proceso o las preferencias del usuario.

- Propiedades finales de la pieza (PP). Propiedades mecánicas de la pieza fabricada

por medio de la tecnología aditiva (resistencia mecánica, integridad microestructural, resistencia a la fatiga...).

- Complejidad del post-procesado (CP). Estimación del número, complejidad y coste de las operaciones de postproceso necesarias para completar la fabricación de la pieza objetivo
- Sostenibilidad del proceso (SP). Impacto ecológico del proceso teniendo en cuenta consumo, reciclaje y rendimiento del material empleado.
- Preferencias del usuario (PU). Preferencias personales considerando cuestiones como: facilidad de uso del equipo (tanto hardware como CNC), integración de sensores, herramientas capa software (diseño, planificación, coste, CAD/CAM...).

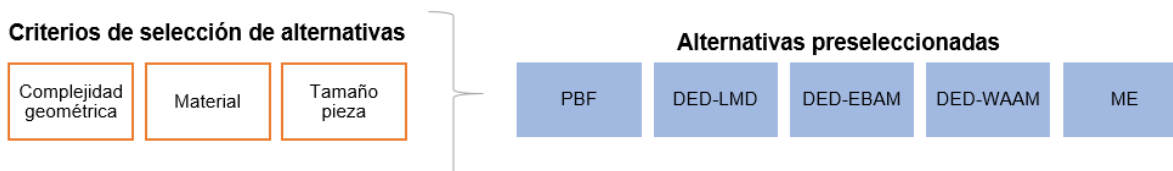
Una vez definidos los criterios se construye la matriz de importancia. Los valores asignados a todos los elementos que se encuentren bajo y sobre la diagonal principal de la matriz se han determinado a partir de los resultados de la encuesta que realizaba comparaciones pareadas entre los distintos criterios y niveles. En este sentido, se formularon 17 preguntas en las que había que seleccionar entre dos criterios en un rango del 1-9 (siendo 1 totalmente importante el primer criterio y 9 el contrario) para la selección de una tecnología de fabricación aditiva de metales. En los siguientes apartados se muestra más en detalle tanto la encuesta realizada como la matriz de comparaciones pareadas obtenida en la sección de resultados.

Como novedad para que la selección de la tecnología sea la óptima y vaya orientada a la aplicación final de la pieza, se han preestablecido tres criterios externos, correspondientes a la fase de diseño: complejidad geométrica de la pieza, material y dimensiones de la pieza. Estos criterios son fijos y tienen la misión de excluir aquellas alternativas que no tengan viabilidad técnica para la pieza que quiere evaluar el usuario final, como se muestra en la Figura 3. Funcionaran como un filtro de selección previo de alternativas.

2.2 Selección de alternativas

Para construir la matriz de alternativas se han identificado, mediante un análisis de mercado y una revisión bibliográfica, las tecnologías de fabricación aditiva más usadas para fabricar piezas metálicas. Se han seleccionado las tres tecnologías más comercializadas y que su uso está más extendido a nivel industrial: fusión de lecho de polvo (Power Bed Fusion, PBF), extrusión de material (Material Extrusion, MEX) y deposición de energía focalizada (Directed Energy Deposition ,DED); siendo esta última dividida en función de la naturaleza de la fuente de energía y del formato del material introducido: Laser Metal Deposition, LMD (deposición de material por láser), Electron Beam Melting, EBAM (fabricación aditiva por haz de electrones) y Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM (fabricación aditiva por arco de alambre).

Figura 3: Alternativas preseleccionadas y criterios de selección excluyentes



Los valores de cada tecnología en cada criterio se han resuelto en base a la bibliografía expuesta en el primer apartado y se muestran en la Tabla 3, unificando los resultados en un único baremo que va desde muy alto a muy bajo, para, posteriormente poder realizar su ponderación. En aquellos criterios en los que no se ha encontrado información o son valores subjetivos se realizará una segunda encuesta, enfocada a un perfil de entrevistado puramente técnico, para ponderar el valor de cada alternativa al criterio preguntado de forma pareada.

Tabla 3: Valores de cada alternativa en los criterios objetivos

	PBF (Ladani and Sadeghilaridjani, 2021)	DED-LMD (Kittel et al., 2020)	DED-EBAM (Stawovy, 2018)	DED-WAAM (Suárez et al., 2021)	ME (Suwanpreecha and Manonukul, 2022)
Precio maquina (PM)	Medio-Alto	Medio	Alta	Bajo	Medio-Bajo
Coste fabricación (CF)	Muy alta	Alto	Bajo	Medio-Bajo	Bajo
Productividad (P)	Bajo	Media - baja	Media	Muy alta	Alta
Propiedades finales de la pieza (PP)	Alta	Alta	Media	Medio alto	Medio-Bajo

Nota: Los valores para los criterios de Fiabilidad, Acabado de la pieza tras la impresión, Complejidad del post-procesado, Sostenibilidad del proceso, Preferencias del usuario serán evaluados mediante encuesta a expertos y presentados en una futura extensión a este trabajo.

A su vez, se han fijado los valores para cada alternativa a los criterios de preselección como se muestra en la Tabla 4. Estos valores determinarán las alternativas a valorar en la matriz de selección final.

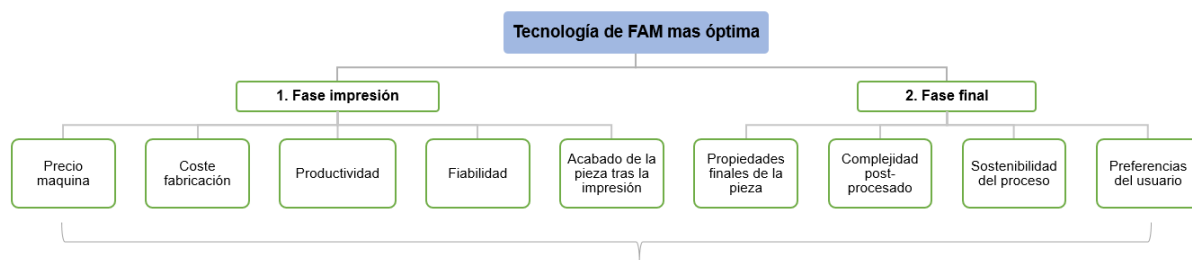
Tabla 4: Valores de cada tecnología en los criterios de selección de alternativas

	PBF	DED-LMD	DED-EBAM	DED-WAAM	ME
Complejidad geométrica	Alta	Media	Media - Baja	Media - Baja	Media
Material	Polvos metálicos: SS, Ni, Ti; Aleaciones de Al; Acero para herramientas; Superaleaciones y Compuestos metal-cerámicos	Polvos y alambres: Aleaciones de Titanio, Aceros Inoxidables, Aleaciones de Níquel, Aleaciones de Cobalto, Aceros para Herramientas, Superaleaciones y compuestos metal-cerámicos			Filamentos rellenos de metal cobre, titanio, aluminio y acero inoxidable
Tamaño pieza	Mediano	Grande	Grande	Grande	Pequeño

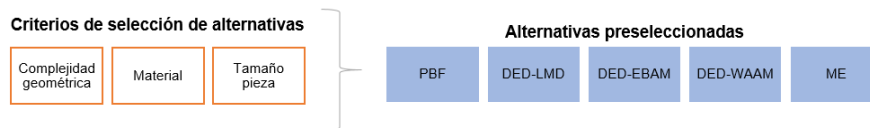
Definidos los criterios y las alternativas, la jerarquía resultante para la toma de decisiones se muestra en la Figura 4 de una forma más gráfica.

Figura 4: Estructura jerárquica final para la selección de la tecnología de FAM. a) Descripción del objetivo y los criterios evaluados b) Criterios de exclusión y alternativas contempladas inicialmente.

a)



b)



2.3 Recopilación de información y elaboración de encuestas

La fase de recopilación de información comienza con la elaboración de encuestas a expertos en fabricación aditiva (sector industrial y ámbito universitario) y diseñadores y clientes de piezas metálicas. Las encuestas se realizaron entre los meses de noviembre y diciembre de 2022. Éstas identifican el nivel de importancia de cada criterio a evaluar en la matriz AHP, permitiendo asignar posteriormente peso a cada criterio. El peso hace referencia a cuán importante o preferible es un criterio sobre otro, tomando como base una comparación pareada.

La encuesta se ha dividido en dos secciones. En la primera sección se consultó la importancia de los criterios de primer nivel (fase de impresión Vs fase de acabado). Enfrentando ambos criterios en una escala del uno al 9, siendo 1 totalmente importante o preferible el primer criterio y 9 el contrario. La segunda sección contenía los criterios de segundo nivel, enfrentándose del mismo modo, a pares entre sí, de forma independiente entre fases.

A modo de ejemplo una de las preguntas de la encuesta fue:

“Coste de fabricación Vs Acabado de la pieza tras la impresión:

¿A la hora de seleccionar una tecnología de fabricación aditiva para piezas metálicas, que es más importante para ti? Seleccione del 1 al 9, siendo 1, totalmente importante el primer criterio y 9 totalmente importante el contrario para seleccionar la tecnología.

3. Resultados

Con las respuestas obtenidas se han realizado las matrices de comparación para obtener los pesos de cada criterio. En un primer paso se han extraído en base al grupo de decisión en el que se encontraba (nivel de jerarquía). La Tabla 5 muestra el peso que adquiere cada criterio principal en la matriz de importancia; estos resultados reflejan que la Fase de impresión en su conjunto (con los criterios que engloba) es más importante a la hora de la seleccionar una tecnología de fabricación aditiva de metales. Su peso es de 0,683 (68,3%) versus 0,317 (31,7%) que tiene la Fase final. La Tabla 6 muestra los pesos de los subcriterios, evaluados a pares de forma independiente dentro de cada criterio principal. En la Fase de impresión el criterio que adquiere más importancia con un 0,444 (44,4%) del peso es la Fiabilidad y en la Fase final el criterio de Propiedades finales de la pieza con un 0,585 (58,5%). La Figura 5 muestra, de una forma más gráfica, con un diagrama de barras los pesos obtenidos de cada criterio evaluado en cada nivel.

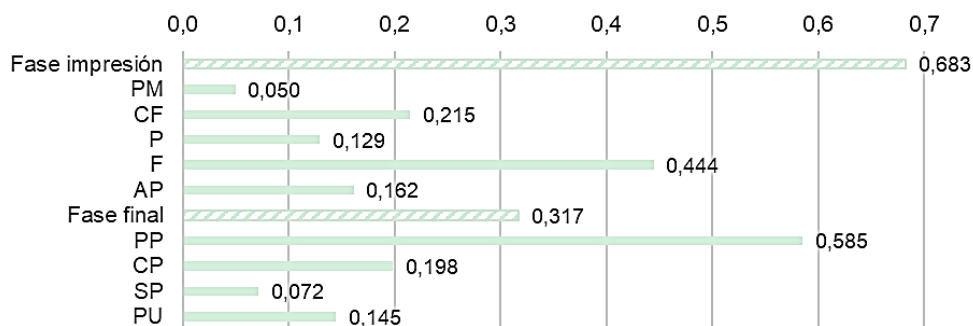
Tabla 5: Resultado del peso (vector propio) de los criterios principales

Criterio principal	Peso de la toma de decisiones en grupo (wt)	Ranking
Fase impresión	0,683	1
Fase final	0,317	2

Tabla 6: Resultado del peso (vector propio) de los subcriterios por grupo

Subcriterio	Peso de la toma de decisiones en grupo (wt)	Ranking
Fase impresión		
Precio maquina (PM)	0,050	5
Coste fabricación (CF)	0,215	2
Productividad (P)	0,129	4
Fiabilidad (F)	0,444	1
Acabado de la pieza tras la impresión (AP)	0,162	3
Fase final		
Propiedades finales de la pieza (PP)	0,585	1
Complejidad del post-procesado (CP)	0,198	2
Sostenibilidad del proceso (SP)	0,072	4
Preferencias como usuario (PU)	0,145	3

Figura 5: Gráfico comparativo de los pesos obtenidos en cada criterio evaluado por niveles



Tras obtener los pesos de cada criterio por grupo, en un segundo paso se realiza la matriz de importancia final de criterios. La Tabla 7 muestra el vector propio de dicha matriz. Este vector define la importancia de cada uno de los criterios, considerando el mayor valor como la opción más importante y el de menor valor el menos importante o preferible. Los resultados muestran como la Fiabilidad, las propiedades finales de la pieza, el coste de fabricación y el acabado de la pieza tras la impresión son los criterios más importantes para los encuestados. Al contrario, la Sostenibilidad del proceso, el Precio de la máquina y las Preferencias como usuario son los criterios menos valorados. La Productividad y la Complejidad del post-procesado se sitúan en el quinto y sexto lugar.

Tabla 7: Resultados del peso de cada criterio vectorizado ordenado por importancia

	wt
Fiabilidad (F)	0,304
Propiedades finales de la pieza (PP)	0,186
Coste fabricación (CF)	0,147
Acabado de la pieza tras la impresión (AP)	0,110
Productividad (P)	0,088

Complejidad del post-procesado (CP)	0,063
Tus preferencias como usuario (PU)	0,046
Precio maquina (PM)	0,034
Sostenibilidad del proceso (SP)	0,023

1

4. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado la aplicación de la metodología AHP para la determinar la alternativa óptima para fabricar hoy en día piezas metálicas. Algunas de las conclusiones a las que se han llegado son:

- Se han considerado 5 tecnologías de fabricación aditiva metálica. Y se han definido criterios de clasificación para la fase de impresión y para la fase posterior. Los criterios previos, en la fase de diseño, se consideran excluyentes, ya que ciertos requisitos de diseño limitan la cantidad de tecnologías a evaluar.
- Para la evaluación del peso que los criterios tienen a la hora de la toma de decisión de la tecnología de fabricación se ha consultado por medio de encuesta a expertos. Los criterios asociados a la Fase de impresión 0,683 son percibidos por los encuestados como más importantes que los asociados a la Fase final 0,317.
- En cuanto a los criterios si se comparan teniendo en cuenta la fase a la que pertenecen, el criterio más valorado es la Fiabilidad del proceso con un valor de 0,304 y las Propiedades finales de la pieza con un valor de 0,186, dos de los nueve valores suponen la mitad del peso en la decisión de la alternativa.
- El criterio de Propiedades finales de la pieza adquiere la mayor importancia dentro de su grupo con un 0,585, siendo incluso el subcriterio con mayor peso. A la hora de generar el peso teniendo en cuenta el grupo de pertenencia, esté criterio pasa a ser el segundo por pertenecer a la Fase final.

5. Limitaciones y líneas futuras

La industria de la fabricación aditiva está en constante estudio y evolución. Esto hace que tanto los criterios como las tecnologías seleccionadas tengan una validez puntual, puesto que la variabilidad de los parámetros por nuevos desarrollos y la posible aparición de nuevas tecnologías pueden afectar en la selección óptima.

Es por eso, que como punto de partida y en continuación a este artículo, tras obtener la importancia de los criterios se van a evaluar (mediante encuestas a expertos), la importancia de cada alternativa a cada criterio para realizar la matriz final del análisis multicriterio. Este estudio deberá reevaluarse periódicamente conforme a la evolución de las tecnologías de fabricación aditiva de metales.

Referencias

- Ariff, H., Salit, Mohd.S., Ismail, N., Nukman, Y., 2012. Use of Analytical Hierarchy Process (AHP) for Selecting The Best Design Concept. Jurnal Teknologi. <https://doi.org/10.11113/jt.v49.188>
- Ghughe, S., Dohale, V., Akarte, M., 2022. Spare part segmentation for additive manufacturing – A framework. Computers & Industrial Engineering 169, 108277. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108277>

- Harata, Y., Otake, N., 2023. Digital Transformation and the Evolution of the Additive Manufacturing Business, in: Khare, A., Baber, W.W. (Eds.), *Adopting and Adapting Innovation in Japan's Digital Transformation, Economics, Law, and Institutions in Asia Pacific*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 125–136. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0321-4_8
- Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., UI Haq, M.I., 2022. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers* 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- Karlsson, D., Lindwall, G., Lundbäck, A., Amnebrink, M., Boström, M., Riekehr, L., Schuisky, M., Sahlberg, M., Jansson, U., 2019. Binder Jetting of the AlCoCrFeNi Alloy. *Additive Manufacturing*.
- Kittel, J., Gasser, A., Wissenbach, K., Zhong, C., Schleifenbaum, J.H., Palm, F., 2020. Case study on AM of an IN718 aircraft component using the LMD process. *Procedia CIRP* 94, 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.061>
- Klahn, C., Omidvarkarjan, D., Meboldt, M., 2018. Evolution of Design Guidelines for Additive Manufacturing - Highlighting Achievements and Open Issues by Revisiting an Early SLM Aircraft Bracket, in: Meboldt, M., Klahn, C. (Eds.), *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6_1
- Kunchala, P., Kappagantula, K., 2018. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers. *Materials and Design* 155, 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>
- Ladani, L., Sadeghilaridjani, M., 2021. Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals. *Metals* 11, 1391. <https://doi.org/10.3390/met11091391>
- M.B., A., S., V., 2018. Application of fuzzy AHP – TOPSIS for ranking additive manufacturing processes for microfabrication. *RPJ* 24, 424–435. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2016-0160>
- Parandoush, P., Lin, D., 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures* 182, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- Pragana, J.P.M., Sampaio, R.F.V., Bragança, I.M.F., Silva, C.M.A., Martins, P.A.F., 2021. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2, 100032–100032. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032>
- Pratheesh Kumar, S., Elangovan, S., Mohanraj, R., Ramakrishna, J.R., 2021. Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes. *Materials Today: Proceedings* 46, 7907–7920. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.567>
- Saaty, T.L., 2008. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat.* 102, 251–318. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48, 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-l](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-l)
- Saaty, T.L., 1987. Risk-Its Priority and Probability: The Analytic Hierarchy Process. *Risk Analysis* 7, 159–172. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1987.tb00980.x>
- Sánchez, R., 2001. La toma de decisiones con múltiples criterios. Un resumen conceptual y teórico, Centro de Planificación y gestión, Universidad.
- Satish Prakash, K., Nancharaih, T., Subba Rao, V.V., 2018. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview. *Materials Today: Proceedings* 5, 3873–3882. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>
- Schuhmann, D., Rupp, M., Merkel, M., Harrison, D.K., 2022. Additive vs. Conventional Manufacturing of Metal Components: Selection of the Manufacturing Process Using the AHP Method. *Processes* 10, 1617. <https://doi.org/10.3390/pr10081617>
- Sonar, H.C., Khanzode, V.V., Akarte, M.M., 2021. Ranking of Additive Manufacturing Implementation Factors using Analytic Hierarchy Process (AHP). *J. Inst. Eng. India Ser. C* 102, 421–426. <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00645-9>

- Stawovy, M.T., 2018. Comparison of LCAC and PM Mo deposited using Sciaky EBAM™. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 73, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.02.009>
- Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., Lamikiz, A., 2021. Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part. *Journal of Manufacturing Processes* 64, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.012>
- Suwanpreecha, C., Manonukul, A., 2022. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals* 12, 429. <https://doi.org/10.3390/met12030429>
- Tofail, S.A.M., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., Charitidis, C., 2018. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today* 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Triantaphyllou, E., Mann, S., 1995. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges. *The International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice* 2, 35–44.
- Tyflopoulos, E., Steinert, M., 2022. A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization. *Applied Sciences* 12, 611. <https://doi.org/10.3390/app12020611>
- Uralde, V., Suarez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Ballesteros, T., 2022a. Wall Fabrication by Direct Energy Deposition (DED) Combining Mild Steel (ER70) and Stainless Steel (SS 316L): Microstructure and Mechanical Properties. *Materials* 15, 5828. <https://doi.org/10.3390/ma15175828>
- Uralde, V., Veiga, F., Aldalur, E., Suarez, A., Ballesteros, T., 2022b. Symmetry and Its Application in Metal Additive Manufacturing (MAM). *Symmetry* 14, 1810. <https://doi.org/10.3390/sym14091810>
- Veiga, F., Bhujangrao, T., Suárez, A., Aldalur, E., Goenaga, I., Gil-Hernandez, D., 2022. Validation of the Mechanical Behavior of an Aeronautical Fixing Turret Produced by a Design for Additive Manufacturing (DfAM). *Polymers* 14. <https://doi.org/10.3390/polym14112177>
- Veiga, F., Suárez, A., Aldalur, E., Goenaga, I., Amondarain, J., 2021. Wire Arc Additive Manufacturing Process for Topologically Optimized Aeronautical Fixtures. *3D Printing and Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0008>
- Zhang, X., Wu, X., Shi, J., 2020. Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology* 9, 9029–9048. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131>
- Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., Zhang, W., 2021. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics* 34, 91–110. <https://doi.org/10.1016/J.CJA.2020.09.020>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

