

Fusión por Lecho de Polvo: Proceso de Manufactura y Relevancia Industrial

Harold Sánchez-Hernández ¹, Juventino López-Barroso ¹, Beatriz Adriana Salazar Cruz ², Cynthia Graciela Flores-Hernández ^{1,*}

¹ División de Posgrado e Investigación, Plantel Norte, Tecnológico Nacional de México campus Querétaro, Santiago Zacatlán s/n, Colonia Jardines de Santiago, C.P. 76148, Querétaro, Querétaro, México.

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Prol. Bahía de Aldahir y Av. de las Bahías S/N, Parque de la Pequeña y Mediana Industria, 89600, Altamira, Tamaulipas, México.

* Autor de correspondencia: cynthiagraciela84@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 12 de febrero de 2026

Aceptado: 27 de julio de 2026

Publicado: 1 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.686>

Resumen: El presente trabajo ofrece una visión general del proceso de fusión por lecho de polvo, una de las tecnologías más avanzadas dentro de la manufactura aditiva, la cual consiste en utilizar una fuente de energía para fundir selectivamente partículas de polvo capa por capa hasta crear un objeto tridimensional. A partir de una revisión documental, se explican las fases clave del proceso, desde la preparación del polvo y el archivo digital hasta la fusión selectiva y el postprocesamiento, describiendo además sus mecanismos físicos y relevancia industrial. Asimismo, se destaca la importancia de controlar parámetros como la energía, la atmósfera, la velocidad de escaneo y la distribución del tamaño de partícula. El artículo concluye que el proceso de fusión por lecho de polvo es una tecnología con gran potencial para la Industria 4.0 debido a su integración digital, capacidad de personalización y su viabilidad para habilitar una manufactura sostenible y automatizada, consolidándose como una plataforma clave para el desarrollo futuro de materiales y componentes avanzados de ingeniería.

Palabras clave: fusión por lecho de polvo, manufactura aditiva, metalurgia, impresión 3D

Introducción

En las últimas décadas, la manufactura aditiva, conocida popularmente como impresión 3D, ha evolucionado de ser una herramienta para prototipado rápido a convertirse en un pilar de la manufactura avanzada en múltiples industrias. A diferencia de los métodos tradicionales de corte o desbaste, esta tecnología construye objetos añadiendo material capa por capa a partir de un modelo digital. Esto permite una libertad geométrica sin precedentes, la reducción de desperdicios y una personalización prácticamente ilimitada, trascendiendo las barreras de procesos convencionales como el moldeo o el mecanizado (Gibson *et al.*, 2021).

Dentro de esta gran variedad de tecnologías, destaca la fusión por lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés). Esta técnica emplea láseres de alta potencia o haces de electrones para fundir selectivamente polvos metálicos o poliméricos (Papatheodorou *et al.*, 2025). Su gran diferenciador es el nivel de control térmico y estructural que ofrece: permite obtener densidades cercanas al 100 %, microestructuras a medida y propiedades mecánicas superiores a las convencionales. Este entorno es ideal para desarrollar piezas con optimización topológica y materiales avanzados, como aleaciones de alta entropía o estructuras tipo celosía, lo cual resulta crítico en industrias altamente exigentes como la aeroespacial, biomédica y automotriz (Arumugaprabu *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2020).

El presente artículo describe los principios de funcionamiento del proceso PBF, sus mecanismos físicos subyacentes, su capacidad para procesar materiales avanzados y su relevancia estratégica en la industria actual.

Tabla 1. Tabla comparativa de los procesos de manufactura aditiva (Gao *et al.*, 2015)

Categorías	Tecnologías	Material	Fuente de energía	Fortalezas/desventajas
Extrusión de Material	Fused Deposition Modeling (FDM) Contour Crafting	Termoplásticos, pastas cerámicas, pastas metálicas	Energía térmica	+ Máquina económica + Impresión multimaterial – Resolución limitada – Acabado superficial pobre
Fusión de Lecho de Polvo	Selective Laser Sintering (SLS) DMLS / SLM Electron Beam Melting (EBM)	Poliamidas, polímeros, polvos metálicos (17-4PH, CoCr, Ti6Al4V), cerámicos	Láser de alta potencia / Haz de electrones	+ Alta precisión y detalle + Piezas totalmente densas + Alta resistencia – Necesita soportes (según proceso) – Manejo y reciclaje de polvo

Continuación de Tabla 1. Tabla comparativa de los procesos de manufactura aditiva (Gao *et al.*, 2015)

Categorías	Tecnologías	Material	Fuente de energía	Fortalezas/desventajas
Fotopolimerización	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros, cerámicas (alúmina, zirconia, PZT)	Láser ultravioleta	+ Alta velocidad + Buena resolución – Sobrecurado – Alto costo de materiales
Inyección de Material	PolyJet / Impresión por inyección	Fotopolímeros, cera	Térmica / Fotocurado	+ Multimaterial + Excelente acabado superficial – Baja resistencia mecánica
Unión por Aglutinante (Binder Jetting)	Binder Jetting	Polvos (base polímero, cerámico o metal)	Energía térmica	+ Impresión a color + Amplia variedad de materiales – Requiere infiltración – Alta porosidad
Manufactura por laminación	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Películas plásticas, papel, láminas metálicas	Haz láser	+ Buen acabado superficial – Alto desperdicio de material – Problemas de adherencia entre capas
Deposición de energía dirigida	LENS (Laser Engineered Shaping) / EBW (Electron Beam Welding)	Polvos metálicos fundidos	Haz láser	+ Reparación de componentes + Gradientes funcionales – Equipo costoso – Requiere postprocesos

Desarrollo

¿Qué es la fusión por lecho de polvo?

El PBF es una familia de procesos de manufactura aditiva en la cual un láser o haz de electrones funde selectivamente partículas de polvo capa por capa hasta formar un objeto tridimensional. La forma final se obtiene a partir de un modelo digital (CAD), que se “corta” en capas muy delgadas (típicamente entre 20 y 100 μm) mediante un software especializado (Papatheodorou *et al.*, 2025).

Según la norma ISO/ASTM 52900:2021, el proceso PBF incluye diferentes variantes que se eligen dependiendo del tipo de material y las exigencias mecánicas de la pieza final. Selective Laser Sintering (SLS): Utiliza un láser para unir (sinterizar) polímeros termoplásticos. Es la opción ideal para fabricar piezas plásticas funcionales, flexibles y ligeras de manera rápida, siendo muy común en el diseño industrial y la creación de prototipos.

Selective Laser Melting (SLM) o Laser Powder Bed Fusion (LPBF): Emplea un láser de alta potencia para fundir metales por completo. Se utiliza cuando se requieren piezas metálicas de alta densidad y resistencia estructural, como componentes automotrices, piezas aeroespaciales o implantes médicos personalizados.

Electron Beam Melting (EBM): A diferencia de las anteriores, utiliza un haz de electrones en condiciones de vacío. Se prefiere específicamente para materiales metálicos de muy alto punto de fusión (como las aleaciones de titanio) y es muy valorada en la industria aeroespacial, ya que sus altas temperaturas de trabajo reducen las tensiones internas en la pieza fabricada.

Aunque cada variante utiliza condiciones físicas distintas, el principio básico es el mismo: un haz de energía une el polvo para crear una pieza sólida siguiendo las instrucciones digitales.

¿Cuáles son las fases del proceso PBF?

- Preparación del polvo y del archivo digital: Todo comienza con un archivo CAD, que posteriormente se convierte en un conjunto de capas por medio de software. El material en forma de polvo fino y con distribución

de tamaño controlada (generalmente entre 10 y 60 μm), se carga en la máquina para garantizar uniformidad y estabilidad durante la fusión.

- **Distribución de la capa de polvo:** El equipo deposita una delgada capa de polvo sobre una plataforma mediante un rodillo. Este paso es clave ya que una capa mal distribuida afecta la calidad en cuanto a porosidad y precisión dimensional del objeto fabricado.
- **Fusión selectiva del polvo:** El láser o haz de electrones recorre la superficie siguiendo un patrón definido. La energía suministrada provoca la fusión o sinterización del polvo, generando microestructuras metálicas o poliméricas de alta densidad. La interacción entre energía, velocidad de escaneo y temperatura determina la calidad de la unión entre capas.
- **Descenso de la plataforma y repetición:** Una vez terminada la capa, la plataforma baja una fracción de milímetro y el proceso se repite. Con cientos o miles de capas, se crea un objeto sólido con geometrías imposibles para métodos tradicionales.
- **Remoción del polvo y post-procesamiento:** La pieza terminada queda rodeada de polvo sin fundir, que puede recuperarse y reutilizarse. Dependiendo del material, la pieza puede requerir tratamiento térmico, eliminación de soportes, acabado superficial o maquinado de precisión (Królicka & Malawska, 2024).

¿Cómo funciona el proceso PBF?

Una de las características más importantes del proceso PBF es que requiere maquinaria altamente especializada, capaz de regular con precisión la temperatura, la atmósfera interna, la energía aplicada y el nivel de exactitud durante toda la fabricación. Diversos autores coinciden en que el control de la atmósfera y del entorno térmico es fundamental para garantizar la estabilidad del baño de fusión y evitar defectos asociados a la oxidación del polvo, especialmente en materiales metálicos sensibles (DebRoy *et al.*, 2018; Gibson *et al.*, 2021).

En la Tabla 2 se detalla el funcionamiento de cada componente, mientras que en la Figura 1 se ilustra el proceso. Como se puede observar en el esquema, el ciclo de fabricación se basa en un movimiento coordinado: un émbolo eleva el depósito con el nuevo stock de polvo, un rodillo esparce una capa fina de este material, y la plataforma de construcción desciende progresivamente a medida que el láser funde selectivamente el lecho de polvo superior para ir formando el objeto.

Tabla 2. Partes del proceso PBF, funciones y aspectos críticos

Componente	Función	Aspectos críticos
Cámara de impresión	Mantiene un ambiente controlado (inerte o vacío)	Control de atmósfera y temperatura
Plataforma de construcción	Soporte de la pieza y base térmica	Alineación precisa, temperatura estable
Sistema de energía (láser o haz de electrones)	Funde selectivamente el polvo	Potencia, modo de operación, interacción energía–potencia
Sistema óptico con galvanómetros	Dirige y enfoca velozmente el haz de energía sobre el lecho de polvo	Velocidad de escaneo, resolución del punto
Recoater (sistema de distribución de polvo)	Deposita capas delgadas y uniformes	Homogeneidad y espesor controlado
Control térmico	Mantiene estabilidad del baño de fusión	Resistencias, lámparas IR, sensores, predicción térmica
Sistema de recuperación de polvo	Reutilización segura del material	Tolvas cerradas, filtros HEPA, tamizado
Software de control y monitoreo	Coordina estrategias de escaneo, temperatura y simulaciones	Integración Industria 4.0, gemelo digital

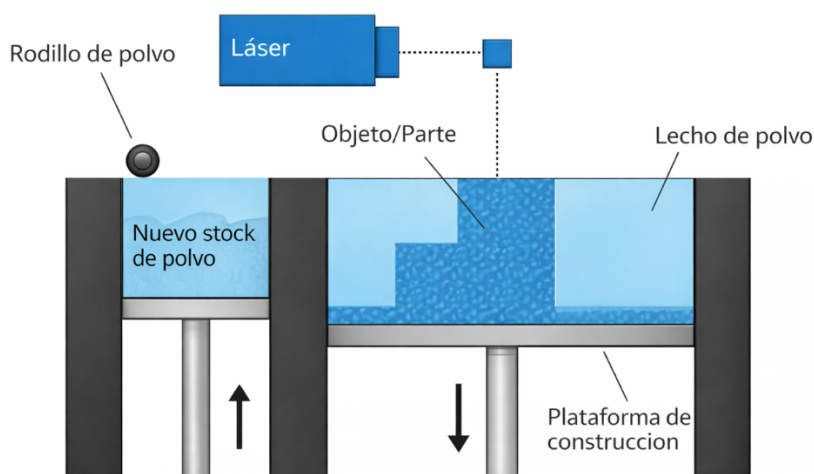


Figura 1. Ilustración del proceso PBF. Adaptado de Singh *et al.* (2020).

¿Qué mecanismos físicos intervienen en el proceso PBF?

El éxito del proceso depende de fenómenos termodinámicos y metalúrgicos altamente controlados:

- Transferencia de calor localizada: El láser produce un baño de fusión cuya estabilidad determina la densidad y las propiedades mecánicas de la pieza.
- Solidificación rápida: Las piezas experimentan tasas de enfriamiento muy altas, lo que genera microestructuras finas y, en algunos casos, fases metaestables difíciles de obtener por otras rutas
- Tensión residual: Debido a los gradientes térmicos, pueden formarse tensiones que requieren tratamientos posteriores para mejorar el desempeño.
- Moldeado sin contacto: Al no usar herramientas mecánicas, se minimiza el desgaste y la necesidad de fixtures.

Estos mecanismos permiten lograr piezas complejas y de alta resistencia, lo que explica el creciente interés de la industria metalmecánica, biomédica y aeroespacial (Arumugaprabu *et al.*, 2025).

Aplicaciones actuales de PBF

Aeroespacial

Empresas como GE Aviation producen componentes de turbinas, inyectores de combustible y soportes estructurales con geometrías optimizadas que reducen peso y mejoran eficiencia. La resistencia y confiabilidad son críticas en este sector, y PBF cumple con los estándares aeronáuticos (Gu *et al.*, 2020).

Medicina y biomateriales

El proceso PBF permite fabricar implantes personalizados, prótesis, placas óseas y estructuras porosas que facilitan la osteointegración. En especial, los implantes de titanio producidos mediante EBM o SLM han mostrado excelentes propiedades mecánicas y biocompatibilidad (Del Bosque *et al.*, 2024).

Automotriz

Se utiliza para componentes ligeros, conductos, utillajes y refacciones difíciles de conseguir. Además, favorece la manufactura rápida de moldes con canales de enfriamiento (Zhao *et al.*, 2023).

Ingeniería de materiales

PBF es una herramienta clave para investigar nuevas aleaciones, microestructuras y materiales funcionales. Por ejemplo, la fabricación de aleaciones de alta entropía, superaleaciones y gradientes funcionales es más simple mediante esta técnica que por métodos convencionales (Zhou *et al.*, 2020).

Sector energético

Permite procesar superaleaciones para fabricar componentes sometidos a condiciones extremas, como álabes de turbinas e intercambiadores de calor, Así como estructuras con gran resistencia a la corrosión y a temperaturas elevadas (Caiazzo *et al.*, 2017).



Figura 2. Aplicaciones del proceso PBF.

¿Qué aplicaciones tendrá en el futuro?

- Componentes multimaterial con gradientes funcionales: Útiles para turbinas, dispositivos biomédicos y electrónica avanzada.
- Microestructuras inteligentes: Capaces de cambiar de forma, absorber impactos o modificar su rigidez.
- Producción de baterías impresas: Electrodo porosos con mayor capacidad y eficiencia energética.
- Fabricación in situ en el espacio: En lugar de lanzar cohetes con toneladas de costosos repuestos desde la Tierra, el proceso PBF permitirá a los astronautas imprimir herramientas y piezas de repuesto a pedido, directamente en estaciones espaciales o durante futuras misiones a Marte, lo cual resolverá enormes retos logísticos de transporte.
- Optimización automática mediante Inteligencia Artificial: En lugar de depender del ensayo y error humano, algoritmos de IA analizarán datos de impresiones previas para predecir fallas. Esto significa que el sistema podrá diseñar la forma ideal de una pieza y ajustar la máquina en tiempo real para imprimirla perfectamente desde el primer intento, sin necesidad de que un operador experto intervenga (Meng *et al.*, 2020).

La convergencia entre materiales avanzados, automatización y manufactura aditiva permitirá crear productos más ligeros, resistentes, personalizados y sustentables.

Importancia del proceso PBF en la Industria 4.0

La Industria 4.0 se caracteriza por sistemas interconectados, automatización, análisis de datos y modelos de fabricación flexibles. En este contexto, PBF es una tecnología estratégica por varias razones:

- Digitalización total del proceso: Desde el diseño CAD hasta el control de parámetros, todo está digitalmente integrado.
- Fabricación distribuida: Permite producir piezas en múltiples puntos geográficos sin alterar el diseño original.
- Producción bajo demanda: Reduce la necesidad de almacenar grandes inventarios, disminuye costos de transporte y evita desperdicios.
- Integración con gemelos digitales: Se pueden simular los parámetros, predecir distorsiones físicas y analizar las microestructuras de manera virtual, mucho antes de imprimir la pieza real.

- Sostenibilidad: Optimiza el uso de materiales al reciclar casi la totalidad del polvo no fundido, lo que reduce la generación de residuos en comparación con el mecanizado tradicional.
- Personalización masiva: A diferencia de la manufactura tradicional, el proceso PBF elimina la necesidad de fabricar moldes o herramientas específicos. Esto permite producir piezas únicas o lotes pequeños altamente personalizados sin que el costo unitario de producción se incremente, cumpliendo con uno de los paradigmas centrales de la Industria 4.0 (Dilberoglu *et al.*, 2017).

Conclusiones

La tecnología PBF ha demostrado ser una herramienta transformadora capaz de materializar geometrías antes imposibles, aportando un valor incalculable a sectores críticos como el médico y el aeroespacial. Sin embargo, su adopción masiva y definitiva depende de dominar la física del proceso para mitigar defectos inherentes, como la porosidad, las tensiones residuales y la rugosidad superficial. Superar estos obstáculos técnicos, apoyándose en la digitalización y el control inteligente en tiempo real, será la clave para que PBF se consolide no solo como una innovación destacada, sino como el estándar para la fabricación sostenible y la personalización a gran escala en el futuro.

Bibliografía

- Arumugaprabu, V., Arunprasath, K., Rajendran, S., Yang, Y., & Aravindan, S. (2025). Impact of additive manufacturing techniques on metal based composites: A brief review. *Discover Materials*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00432-2>
- Caiazza, F., Alfieri, V., Corrado, G., & Argenio, P. (2017). Laser powder-bed fusion of Inconel 718 to manufacture turbine blades. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9–12), 4023–4031. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0839-3>
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Del Bosque, A., Fernández-Arias, P., & Vergara, D. (2024). Titanium additive manufacturing with powder bed fusion: A bibliometric perspective. *Applied Sciences*, 14(22), 10543. <https://doi.org/10.3390/app142210543>
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Gu, D., Guo, M., Zhang, H., Sun, Y., Wang, R., & Zhang, L. (2020). Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(2), 025001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b00>
- International Organization for Standardization. (2021). *Additive manufacturing — General principles — Terminology* (Norma ISO/ASTM 52900:2021).
- Królicka, A., & Malawska, J. (2024). Recent progress in laser powder bed fusions processes of advanced high-strength steels. *Materials*, 17(19), 4699. <https://doi.org/10.3390/ma17194699>
- Meng, L., McWilliams, B., Jarosinski, W., Park, H., Jung, Y., Lee, J., & Zhang, J. (2020). Machine learning in additive manufacturing: A review. *JOM*, 72(6), 2363–2377. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04155-y>
- Papatheodorou, A., Papadimitriou, N., Stathatos, E., Benardos, P., & Vosniakos, G. (2025). Recent advances in sensor fusion monitoring and control strategies in laser powder bed fusion: A review. *Machines*, 13(9), 820. <https://doi.org/10.3390/machines13090820>
- Singh, D. D., Mahender, T., & Reddy, A. R. (2020). Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415>
- Zhao, N., Parthasarathy, M., Patil, S., Coates, D., Myers, K., Zhu, H., & Li, W. (2023). Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.008>
- Zhou, S., Su, Y., Wang, H., Enz, J., Ebel, T., & Yan, M. (2020). Selective laser melting additive manufacturing of 7xxx series Al-Zn-Mg-Cu alloy: Cracking elimination by co-incorporation of Si and TiB₂. *Additive Manufacturing*, 36, 101458. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101458>