

Challenges and Perspectives in Smart Materials Manufacturing: 4D Printing of Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites

Sergio Gonzalez-Serrud¹; Ana C. González-Valoys^{2,3,4}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ana.gonzalez1@utp.ac.pa

³SNI-SENACYT Sistema Nacional de Investigación-Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Clayton, Ciudad del Saber Edif. 205, Panama City 0816-02852, Panama

⁴Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Tecnología e Ingeniería, Avenida Ricardo J. Alfaro, Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso, Panama City 0819-07289, Panama

Abstract– *4D printing has revolutionized additive manufacturing by enabling the creation of programmable structures that respond to external stimuli. This article analyzes recent advances and key challenges in the fabrication of smart materials using fiber-reinforced thermoplastic composites (FRTPs). Computational modeling approaches such as Finite Element Analysis (FEA), Isogeometric Analysis (IGA), and hybrid techniques incorporating machine learning (ML) are reviewed to enhance simulation accuracy. Additionally, manufacturing challenges, including optimization of printing parameters, fiber-matrix adhesion, and sustainability through the use of recycled thermoplastics, are discussed. Finally, research opportunities are identified to improve the scalability and performance of these materials in industrial applications such as aerospace, biomedical, and robotics.*

Keywords– *4D printing, thermoplastic composites, finite element analysis (FEA), additive manufacturing, smart material.*

Desafíos y perspectivas en la fabricación de materiales inteligentes: Impresión 4D de composites termoplásticos reforzados con fibras

Sergio Gonzalez-Serrud¹; Ana C. González-Valoys^{2,3,4}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ana.gonzalez1@utp.ac.pa

³SNI-SENACYT Sistema Nacional de Investigación-Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Clayton, Ciudad del Saber Edif. 205, Panama City 0816-02852, Panama

⁴Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Tecnología e Ingeniería, Avenida Ricardo J. Alfaro, Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso, Panama City 0819-07289, Panama

Resumen— La impresión 4D ha revolucionado la manufactura aditiva al permitir la creación de estructuras programables que responden a estímulos externos. Este artículo analiza los avances recientes y los principales desafíos en la fabricación de materiales inteligentes a partir de composites termoplásticos reforzados (FRTPs). Se revisan enfoques de modelado computacional como el Análisis de Elementos Finitos (FEA), el Análisis Isogeométrico (IGA) y técnicas híbridas con aprendizaje automático (ML) para mejorar la precisión de simulaciones. Además, se discuten los retos en la manufactura, incluyendo optimización de parámetros de impresión, adhesión fibra-matriz y sostenibilidad mediante el uso de termoplásticos reciclados. Finalmente, se identifican oportunidades de investigación para mejorar la escalabilidad y rendimiento de los materiales en aplicaciones industriales como aeroespacial, biomédica y robótica.

Palabras clave— Impresión 4D, compuestos termoplásticos, análisis de elementos finitos (FEA), fabricación aditiva, material inteligente.

I. INTRODUCCIÓN

El avance acelerado de la impresión 4D ha potenciado las capacidades de la manufactura aditiva al permitir la creación de estructuras impresas con la capacidad de transformarse de manera controlada en función del tiempo y en respuesta a estímulos externos, tales como temperatura, humedad, iluminación y esfuerzos mecánicos [1]. Esta tecnología innovadora se basa en el empleo de materiales con memoria de forma (Shape-Memory Materials, SMMs), lo que posibilita el desarrollo de estructuras adaptativas y dinámicas con aplicaciones en sectores como la ingeniería biomédica, la robótica, la industria aeroespacial y los textiles inteligentes. A diferencia de la impresión 3D convencional, donde las estructuras mantienen una geometría fija, los materiales fabricados mediante impresión 4D incorporan polímeros y compuestos que responden a estímulos, lo que les confiere la capacidad de autoensamblarse, modificar su forma o ajustarse a las condiciones ambientales con el tiempo [2].

Entre los materiales empleados en impresión 4D, los composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) se han destacado como una alternativa prometedora debido a su

elevada resistencia mecánica y su capacidad para modificar su forma de manera programada. En este contexto, el ácido poliláctico (PLA) ha atraído especial interés por sus aplicaciones en impresión 4D gracias a su rigidez, renovabilidad y facilidad de procesamiento [3]. No obstante, el PLA puro presenta limitaciones en términos de resistencia mecánica y eficiencia en la recuperación de forma, lo que restringe su aplicación en sistemas avanzados. Para mitigar estas limitaciones, el refuerzo con fibras—tales como carbono, lino o combinaciones híbridas—ha demostrado mejorar significativamente sus propiedades mecánicas, estabilidad térmica y capacidad de retención de forma en estructuras impresas en 4D [4].

El modelado computacional de FRTPs fabricados mediante impresión 4D es un pilar fundamental para la comprensión y predicción de su respuesta mecánica, su cinética de deformación y su durabilidad a largo plazo. Los métodos tradicionales basados en Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis, FEA) han sido ampliamente utilizados para simular la evolución de estructuras sometidas a estímulos externos. Sin embargo, estas metodologías presentan desafíos en términos de errores de aproximación geométrica e ineficiencias computacionales al modelar geometrías complejas y escenarios de deformación significativa [5]. Para superar estas limitaciones, el Análisis Isogeométrico (Isogeometric Analysis, IGA) ha surgido como una técnica avanzada que ofrece una mayor precisión en la simulación con un menor costo computacional [6].

Recientemente, el desarrollo de técnicas híbridas que combinan FEA e IGA ha mejorado la precisión y eficiencia de los modelos de predicción de deformación. En un estudio reciente, Yu et al. propusieron un modelo híbrido IGA-FEA que reduce significativamente los costos computacionales al tiempo que mantiene una alta precisión en la predicción del comportamiento de estructuras de composites termoplásticos sujetas a esfuerzos residuales [7]. Este enfoque híbrido acelera de manera sustancial el diseño y la simulación de materiales impresos en 4D, permitiendo explorar arquitecturas más complejas y materiales con comportamiento programable.

Además, la integración de algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) en el modelado computacional ha transformado las estrategias de diseño en impresión 4D. Modelos predictivos basados en aprendizaje profundo, como la regresión con bosques aleatorios (Random Forest Regression, RFR), han sido aplicados para analizar grandes volúmenes de datos generados a partir de simulaciones IGA-FEA, logrando predicciones en tiempo real con una precisión superior al 99% [8]. Esta sinergia entre inteligencia artificial y modelado computacional no solo mejora la eficiencia en la simulación, sino que también optimiza la distribución del material y la ubicación de los actuadores, permitiendo la fabricación de estructuras 4D personalizadas con un desempeño mejorado.

Por otro lado, las técnicas de procesamiento de FRTPs han avanzado notablemente para facilitar la fabricación de materiales de alto rendimiento mediante impresión 4D. Métodos convencionales como el Moldeo por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) han sido ampliamente utilizados por su bajo costo y facilidad de adaptación a filamentos compuestos. No obstante, se han identificado desafíos en la adhesión entre capas y la anisotropía en las propiedades mecánicas, lo que requiere una optimización de parámetros de impresión tales como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y el control de la orientación de las fibras [9].

Asimismo, la incorporación de termoplásticos reciclados en la impresión 4D ha despertado un creciente interés como parte de la transición hacia una manufactura aditiva más sostenible. Investigaciones recientes han demostrado que la combinación de PLA reciclado con ABS en proporciones específicas (por ejemplo, 20-25% de PLA en matriz de ABS) puede mejorar la resistencia mecánica y el efecto memoria de forma (Shape-Memory Effect, SME), al tiempo que contribuye a la sostenibilidad ambiental [10].

A pesar de estos avances, todavía persisten desafíos en el modelado computacional y la fabricación de FRTPs para impresión 4D. Algunas de las principales limitaciones incluyen la complejidad computacional asociada a simulaciones a gran escala, la falta de validación experimental en ciertos modelos predictivos y los desafíos en la manufactura de composites, como la adhesión entre la matriz y las fibras, así como la degradación térmica durante los procesos de extrusión. Además, la estabilidad a largo plazo y la reciclabilidad de estos materiales siguen siendo áreas de investigación fundamentales, lo que subraya la necesidad de explorar refuerzos biodegradables y soluciones inspiradas en materiales naturales [11].

Esta revisión tiene como objetivo analizar y sintetizar los avances más recientes en el modelado computacional y procesamiento de composites termoplásticos reforzados para aplicaciones de impresión 4D. Mediante la comparación de diferentes metodologías de simulación, innovaciones en materiales y estrategias de fabricación, este estudio busca resaltar los principales desafíos, identificar vacíos de conocimiento y proponer futuras líneas de investigación para

el desarrollo de tecnologías avanzadas de impresión 4D en materiales compuestos de alto rendimiento.

II. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN

Esta sección describe el enfoque sistemático seguido para analizar y evaluar el estado actual de la investigación sobre el modelado computacional y el procesamiento de composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) en aplicaciones de impresión 4D. La metodología abarca los criterios de selección de literatura, la clasificación de los estudios, el marco de evaluación crítica y las áreas de discusión estructuradas, con el objetivo de garantizar una evaluación integral y objetiva de los avances recientes en el campo.

A. Criterios de selección de la bibliografía

Se realizó una búsqueda sistemática en Google Scholar, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink e IEEE Xplore utilizando la siguiente consulta de búsqueda booleana: ("finite element analysis" OR "CFD simulation")

AND ("fiber reinforced thermoplastic composites" OR "PLA composites" OR "polylactic acid")

AND ("4D printing" OR "additive manufacturing")

La búsqueda se limitó a artículos de revistas revisadas por pares publicadas entre 2019 y 2024 que se centran en el modelado computacional, los métodos de procesamiento y la validación experimental de FRTP impresos en 4D.

A.1. Criterio de selección

Esta revisión incluye estudios sobre modelado computacional (FEA, IGA, ML), validación experimental de técnicas de procesamiento y propiedades mecánicas, térmicas y de memoria de forma de FRTP impresos en 4D. Se excluyeron las investigaciones sobre impresión 3D sin cambio de forma programable, materiales compuestos no termoplásticos y artículos de revisión sin análisis crítico o datos experimentales. Se descartaron los estudios que carecían de validación numérica de los modelos o de verificación empírica de las propiedades de los materiales. La selección garantiza una evaluación rigurosa de los avances en técnicas computacionales, métodos de procesamiento y rendimiento de los materiales, contribuyendo directamente al desarrollo de termoplásticos reforzados con fibra impresos en 4D eficientes, sostenibles y de alto rendimiento.

B. Clasificación de los estudios revisados

Los estudios seleccionados se clasificaron en las siguientes áreas temáticas:

Modelado computacional de FRTP impresos en 4D

- Análisis de elementos finitos (AEF) para predecir la respuesta mecánica [2].
- Análisis isogeométrico (IGA) para una mayor precisión en la distribución de la tensión-deformación [5].
- IGA-FEA híbrido para la eficiencia computacional en simulaciones de estructuras en 4D [5], [6].
- Aprendizaje automático y modelos basados en IA para la predicción rápida de deformaciones en

impresión 4D [3].

Métodos de procesamiento y optimización de termoplásticos impresos en 4D reforzados con fibras

- Modelado por deposición fundida (FDM) y su impacto en la alineación y adhesión de las fibras [9].
- Estrategias de impresión híbrida con refuerzo de fibra continua en termoplásticos [8].
- Efecto de los parámetros de impresión en el comportamiento mecánico, incluyendo la temperatura de extrusión, la velocidad de la boquilla y la orientación del relleno [9], [10].
- Procesado de termoplásticos reciclados para FRTPs impresos en 4D sostenibles [8].

Validación experimental de compuestos reforzados con fibra impresos en 4D

- Caracterización del efecto de memoria de forma (SME) de los materiales compuestos impresos en 4D [8], [11].

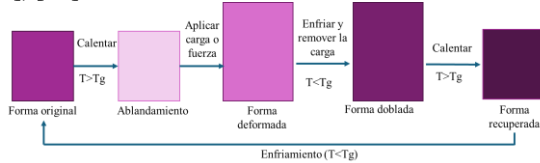


Fig. 1. Mecanismo del efecto de memoria de forma (SME) en polímeros [8].

- Ensayos mecánicos (tracción, flexión, impacto, fatiga) de FRTPs con diferentes tipos de fibras y orientaciones [10].

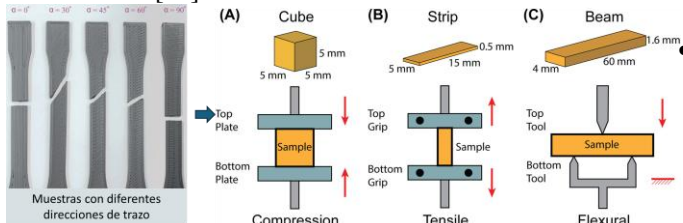


Fig. 2. Configuración de los experimentos de análisis mecánico dinámico (AMD) con diferentes orientaciones. A) Ensayo de compresión. B) Ensayo de tracción con una muestra en forma de tira. C) Ensayo de flexión en tres puntos [2], [8].

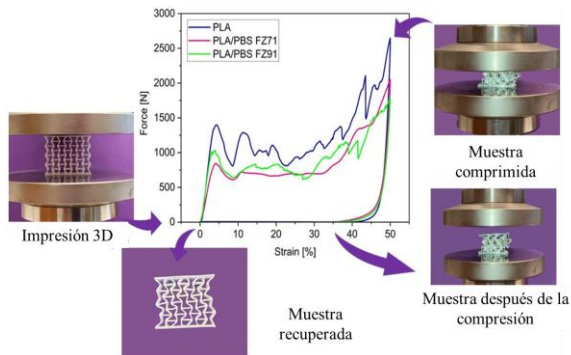


Fig. 3. Gráficas: fuerza versus deformación de compresión cíclica de las muestras fabricadas de PLA y PLA/PBS, junto con imágenes de las muestras en su estado inicial, en la máxima compresión, después de la descarga y tras la

recuperación térmica. Reproducida con permiso de [12].

- Análisis térmico (DSC, TGA) para determinar la estabilidad y las condiciones de activación de los composites impresos en 4D [11], [13], [14].

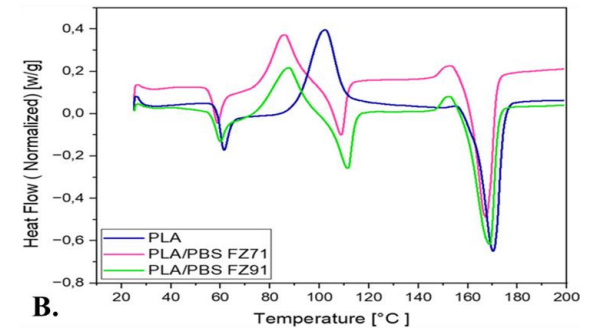
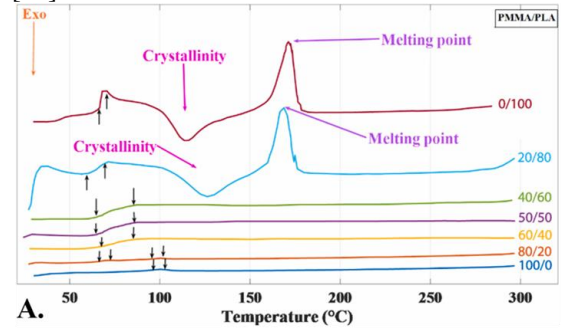


Fig. 4. A) Resultados DSC de muestras PLA/PMMA, realizado por [14]. B) Curvas DSC de tres filamentos extruidos, que comprenden PLA, PLA/PBS FZ71 y PLA/PBS FZ91, realizado por [12].

Microscopía electrónica de barrido (SEM) y estudios morfológicos para evaluar la interacción fibra-matriz [2], [8].

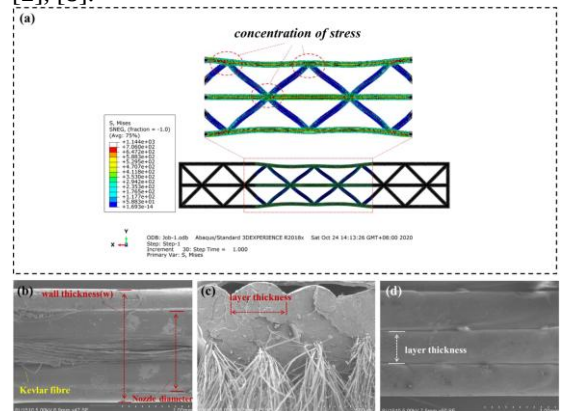


Fig. 5. (A) Mapa de distribución de esfuerzos de tracción en composites celulares reforzados con fibra de carbono (CFRCs). (B-D) Micrografías SEM que ilustran la calidad de los CFRCs depositados: (B) interfaz fibra-matriz, (C) sección transversal fracturada de composites de PLA reforzados con fibra de Kevlar y (D) vista lateral del proceso de deposición fundida. Los parámetros de fabricación incluyen un diámetro de boquilla de 1 mm, un espesor de capa de 0.5 mm, una velocidad de impresión de 60 mm/min, una temperatura de boquilla de 205°C y una temperatura del sustrato de 60°C [11].

C. Metodología para la evaluación crítica

Cada estudio seleccionado se analizó en función de sus objetivos de investigación, enfoque computacional, validación experimental, técnicas de procesamiento y nivel de innovación.

TABLA I
Evaluación de los estudios revisados.

Estudio	Método computacional	Validación experimental	Método de procesamiento	Hallazgos
Yu et al. [2]	Análisis de Elementos Finitos (FEA)	Sí	FDM	Se alcanzó una precisión $\geq 95\%$ en la predicción de deformaciones mediante la integración de FEA con la caracterización del material. Se optimizaron los composites PLA-CFPLA para mejorar su resistencia estructural.
Yu et al. [5]	Enfoque híbrido IGA-FEA con ML	No	N/A	Se integraron IGA y FEA, reduciendo el costo computacional y mejorando la precisión en la predicción de deformaciones. Los modelos de policubos basados en ML lograron una precisión del 99.89% con simulaciones 20 veces más rápidas.
De Kergariou et al.[3]	Modelo interno de Elementos Finitos (FE)	Sí	FDM	Las estructuras compuestas de fibra de lino presentaron actuación higromórfica, optimizando la respuesta a la humedad para materiales programables.
Dong et al. [11]	FEA	Sí	FDM	Un contenido de fibra del 3.8% aumentó la resistencia a la tracción en un 300%. Un mayor contenido de fibra redujo la

				capacidad de recuperación del efecto memoria de forma, mientras que la optimización de los parámetros de impresión mejoró el desempeño mecánico.
Kumar et al. [13]	Sin modelización computacional	Sí	Extrusión de Material (MEX)	La alineación vertical de la fibra de carbono continua (Continuous Carbon Fiber, CCF) mejoró la tasa de recuperación de forma (92.97%), mientras que la alineación horizontal de la CCF logró la mayor fijación de forma (91.78%). Una densidad de relleno de fibra del 40% proporcionó un equilibrio óptimo entre fijación y recuperación.
Sang et al. [14]	Modelado multifísico (Electro-/Magneto-Estimulación)	Sí	Impresión 4D híbrida	Se logró una tasa de recuperación de forma superior al 90%. La activación electromagnética mejoró el tiempo de respuesta, permitiendo deformaciones rápidas y repetitivas en absorbedores de energía y componentes de protección.
Yang et al. [6]	Híbrido de FEA basado en datos y aprendizaje automático	No	N/A	Logró una precisión del 97% en simulaciones de transformación en tiempo real, reduciendo el tiempo computacional en 1018x en comparación con FEA tradicional.

Thakur et al. [8]	Sin modelización computacional	Sí	Extrusión basada en FDM	Investigó el rendimiento mecánico y el efecto memoria de forma (SME) en composites reciclados de ABS-PLA. Una matriz con 20% de PLA en ABS proporcionó el mejor equilibrio entre resistencia a la tracción y recuperación del SME.
-------------------	--------------------------------	----	-------------------------	--

D. Marco de Discusión

Los estudios revisados fueron analizados en tres áreas principales de investigación: modelado computacional, métodos de procesamiento y validación experimental. La siguiente figura ilustra la interconexión entre estas áreas y su impacto en el desarrollo de composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) impresos en 4D.

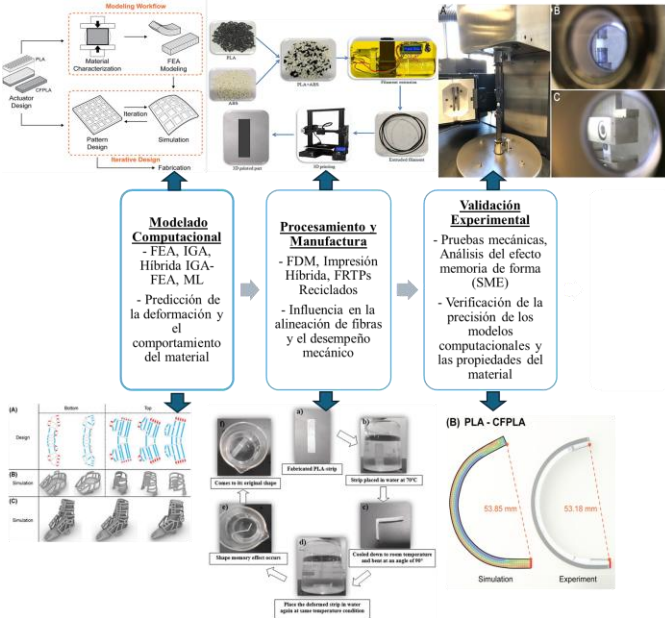


Fig. 6. Interrelación de las áreas de investigación en los FRTPs impresos en 4D. Reproducida con permiso de [2], [5], [8].

Este enfoque estructurado garantiza una revisión integral y sistemática del campo, proporcionando información sobre los avances recientes, las limitaciones existentes y las futuras líneas de investigación en el modelado computacional y el procesamiento de composites termoplásticos reforzados con fibra para aplicaciones de impresión 4D.

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El modelado computacional y el procesamiento de composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) aplicados a la

impresión 4D han experimentado avances significativos. Sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con la precisión en la predicción de deformaciones, la optimización de parámetros de fabricación y la validación experimental de los modelos. Esta sección examina de manera crítica las metodologías actuales en tres áreas fundamentales: enfoques de modelado computacional, técnicas de procesamiento y validación experimental. Se comparan sus eficiencias, se identifican vacíos en el conocimiento y se proponen futuras líneas de investigación.

A. Enfoques de Modelado Computacional para FRTPs Impresos en 4D

El modelado computacional es fundamental para predecir el comportamiento mecánico de los FRTPs impresos en 4D, optimizar la distribución del material y reducir la dependencia de ensayos experimentales extensivos. El Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis, FEA) ha sido ampliamente utilizado para simular la distribución de esfuerzos, la deformación y las tensiones residuales en estructuras impresas en 4D. Yu et al. [2] desarrollaron un marco secuencial basado en FEA para composites de PLA reforzado con fibra de carbono (PLA-CFPLA), logrando una precisión de hasta un 95% en la predicción de deformaciones. Sin embargo, el enfoque tradicional basado en FEA enfrenta importantes limitaciones, como el alto costo computacional asociado al refinamiento de mallas, errores en la aproximación geométrica y un elevado consumo de memoria para simular deformaciones de gran magnitud.

Para abordar estas limitaciones, se ha implementado el Análisis Isogeométrico (Isogeometric Analysis, IGA), el cual permite una representación más precisa de la geometría y mejora las tasas de convergencia. Yu et al. [5] demostraron que el IGA reduce los errores de discretización en la simulación de FRTPs, consolidándose como una herramienta prometedora para aplicaciones que requieren transformaciones geométricas complejas. A pesar de estas ventajas, el IGA sigue siendo computacionalmente exigente y requiere técnicas especializadas de mallado basadas en splines, lo que dificulta su adopción generalizada en la industria.

Como solución eficiente, ha surgido un enfoque híbrido que combina las ventajas del IGA con la eficiencia computacional del FEA. Yu et al. [5] implementaron un modelo híbrido IGA-FEA que redujo significativamente los costos computacionales sin comprometer la precisión en la predicción de transformaciones de forma. Este método facilita una convergencia más rápida y una mejor escalabilidad en arquitecturas impresas en 4D, haciéndolo adecuado para la predicción en tiempo real de deformaciones. No obstante, la integración de este modelado híbrido en aplicaciones industriales sigue siendo limitada debido a problemas de compatibilidad con el software y a la necesidad de conocimientos técnicos especializados.

Por otro lado, el aprendizaje automático (Machine Learning, ML) ha sido aplicado en el modelado predictivo para impresión 4D. Yang et al. [6] desarrollaron un modelo de regresión basado en bosques aleatorios (Random Forest Regression, RFR), entrenado con datos de simulaciones IGA-FEA, alcanzando una precisión superior al 99% en la predicción de deformaciones. Los enfoques basados en ML reducen la dependencia de solucionadores numéricos tradicionales y aceleran la optimización de materiales; sin embargo, su efectividad depende de la disponibilidad de conjuntos de datos de alta calidad y su capacidad de generalización en distintas formulaciones de composites reforzados con fibra sigue siendo un desafío.

B. Procesamiento y Fabricación de Composites Reforzados con Fibra para Impresión 4D

La fabricación de composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) mediante impresión 4D ha experimentado avances significativos, con un enfoque en la mejora de la interacción fibra-matriz, la optimización de los parámetros de impresión y el desarrollo de materiales sostenibles. El Moldeo por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) sigue siendo la técnica predominante debido a su rentabilidad y versatilidad. Sin embargo, el FDM presenta desafíos como defectos de adhesión entre capas, anisotropía en las propiedades mecánicas y la formación de vacíos, lo que compromete la integridad estructural del material. De Kergariou et al. [3] optimizaron estrategias de alineación de fibras en FDM, demostrando que un control preciso de la orientación de las fibras mejora el desempeño mecánico. A pesar de estos avances, los sistemas FDM convencionales carecen de la capacidad de orientar fibras de manera uniforme a escala microscópica, lo que afecta la reproducibilidad en diseños complejos de impresión 4D.

Las técnicas de impresión híbrida, que incorporan refuerzos de fibra continua, han permitido mejorar significativamente las propiedades mecánicas, la estabilidad estructural y la funcionalidad de los composites impresos en 4D. Sang et al. [15] desarrollaron un composite reforzado con fibra de carbono continua (Continuous Carbon Fiber, CCF) con efectos de memoria de forma inducidos magnética y eléctricamente, mediante la incorporación de nanopartículas de Fe_3O_4 en una matriz PLA/TPU. En su estudio, se lograron tasas de recuperación de forma superiores al 90%, con una reducción del tiempo de activación a 22 segundos mediante estimulación eléctrica, mientras que la activación magnética permitió una transformación más uniforme. La combinación de estímulos electromagnéticos mejoró la velocidad de respuesta y la precisión de la deformación, lo que hace que estos materiales sean adecuados para aplicaciones en robótica blanda, aeroespacial y biomédica.

A pesar de estos avances, persisten desafíos en el procesamiento, particularmente en la adhesión fibra-matriz.

Una adhesión deficiente puede provocar delaminación y fallos mecánicos, lo que hace necesario optimizar la temperatura de extrusión, la tensión de la fibra y la velocidad de alimentación. Además, la diferencia en la expansión térmica entre las fibras y la matriz polimérica puede generar acumulaciones localizadas de esfuerzo, requiriendo estrategias avanzadas de gestión térmica. Si bien estos materiales conservan sus propiedades de memoria de forma a lo largo de múltiples ciclos, es necesario continuar con la investigación para evaluar su durabilidad a largo plazo, resistencia a la degradación e integridad mecánica bajo activaciones repetidas. La superación de estos desafíos impulsará la impresión 4D híbrida de próxima generación, orientada hacia composites programables con capacidades mejoradas de transformación morfológica [15], [16].

La sostenibilidad también se ha convertido en un eje central en la investigación sobre impresión 4D. El desarrollo de composites ecológicos y mecánicamente sostenibles es fundamental para el avance de la manufactura aditiva. Thakur et al. [8] exploraron el uso de composites reciclados de ABS-PLA en impresión 4D, demostrando que la incorporación de un 20-25% de PLA en la matriz de ABS mejora tanto la resistencia a la tracción como el efecto memoria de forma (Shape Memory Effect, SME). Estos resultados sugieren que los termoplásticos reciclados pueden ser una alternativa viable para la manufactura aditiva sostenible sin una pérdida significativa en el rendimiento mecánico. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar la reciclabilidad a largo plazo y el impacto ambiental de los FRTPs, particularmente en aplicaciones a gran escala.

C. Validación Experimental y Evaluación del Desempeño

La validación experimental es un aspecto fundamental para garantizar la fiabilidad de los modelos computacionales y optimizar el procesamiento de los composites impresos en 4D. Las pruebas mecánicas han confirmado mejoras en los composites reforzados con fibra, con ensayos de tracción y flexión que verifican un incremento en la rigidez y en la resistencia a la fatiga. El análisis de morfología de fractura mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) ha permitido obtener información detallada sobre la interacción fibra-matriz, revelando que una dispersión inadecuada de las fibras puede generar concentraciones localizadas de esfuerzo y fallos prematuros [2], [8], [11].

Las técnicas de análisis térmico, como la Calorimetría Diferencial de Barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) y el Análisis Termogravimétrico (Thermogravimetric Analysis, TGA), han sido empleadas para evaluar las temperaturas de transición y la estabilidad térmica en composites con capacidad de transformación de forma. La caracterización del efecto memoria de forma (Shape Memory Effect, SME) sigue siendo un parámetro crucial en aplicaciones de impresión 4D, ya que la capacidad de un material para recuperar su forma original tras la exposición a

estímulos externos determina su viabilidad en diseños funcionales. Los resultados experimentales han demostrado que los composites a base de PLA presentan altas tasas de recuperación de forma; sin embargo, se requiere una mayor optimización para mejorar su durabilidad mecánica tras ciclos repetidos de activación [11], [13], [17].

D. Discusión: Principales Limitaciones y Vacíos de Investigación

A pesar del progreso significativo alcanzado, aún persisten varios desafíos en el modelado computacional y el procesamiento de composites termoplásticos reforzados con fibra para impresión 4D. Los costos computacionales siguen siendo elevados, especialmente en simulaciones a gran escala que requieren una alta resolución de malla o modelado multifísico. Los enfoques tradicionales basados en el Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis, FEA) y el Análisis Isogeométrico (Isogeometric Analysis, IGA) requieren una extensa calibración experimental, lo que limita su implementación directa en entornos industriales sin una validación rigurosa. Si bien los modelos basados en aprendizaje automático presentan un gran potencial, su aplicabilidad a diferentes formulaciones de composites sigue siendo un desafío debido a la falta de universalidad en su generalización.

En términos de procesamiento, la obtención de una adhesión precisa entre la fibra y la matriz sigue siendo un reto, lo que impacta las propiedades mecánicas y el comportamiento del efecto memoria de forma en las estructuras impresas. Las técnicas de impresión híbrida, aunque prometedoras, requieren refinamiento adicional antes de su adopción como estándar en la industria. Desde una perspectiva de sostenibilidad, es necesario profundizar en la investigación sobre refuerzos de fibra biodegradables, como el lino y el cáñamo [3], [18], los cuales podrían reducir la huella ambiental de los materiales impresos en 4D.

Esta revisión crítica ha identificado áreas clave en las que se requiere una mayor investigación para mejorar la fiabilidad y escalabilidad de los composites termoplásticos reforzados con fibra impresos en 4D. Las futuras líneas de investigación deben enfocarse en la integración de estrategias de optimización de diseño basadas en inteligencia artificial, la mejora de las estrategias de reciclabilidad de termoplásticos y la estandarización de técnicas de impresión híbrida para maximizar la eficiencia en el refuerzo con fibras.

IV. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Los avances recientes en la fabricación de composites termoplásticos reforzados con fibra (Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, FRTPs) aplicados a la impresión 4D han permitido la integración de estrategias de modelado computacional, optimización de procesos de manufactura y el

desarrollo de materiales con un enfoque sostenible. Herramientas computacionales como el Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis, FEA) y el Análisis Isogeométrico (Isogeometric Analysis, IGA) han demostrado ser fundamentales para mejorar la precisión en la predicción de deformaciones. Además, la implementación de modelos híbridos que combinan FEA e IGA ha permitido reducir el costo computacional sin comprometer la exactitud de los resultados. Sin embargo, la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático para la optimización de materiales sigue presentando retos en términos de su aplicabilidad a diversas formulaciones de composites.

En cuanto a los procesos de manufactura, el Moldeo por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) y las técnicas de impresión híbrida han contribuido a mejorar la orientación de las fibras y las propiedades mecánicas de los composites utilizados en impresión 4D. En particular, la inclusión de refuerzos de fibra continua ha optimizado la rigidez estructural y la resistencia a fallos mecánicos. No obstante, aún se enfrentan desafíos relacionados con la uniformidad en la orientación de las fibras y la capacidad de reproducir el proceso con alta fidelidad. Alternativamente, el uso de materiales reciclados, como combinaciones de ABS y PLA, ha demostrado ser una opción prometedora, aunque la evaluación de su estabilidad a largo plazo y su viabilidad para ser reciclados requiere estudios adicionales.

Para avanzar en la investigación y desarrollo de estos materiales, es esencial continuar con la mejora de los modelos híbridos de simulación mediante la integración de inteligencia artificial y la validación experimental de los resultados obtenidos. Asimismo, la automatización en la deposición de fibras y la implementación de sistemas de extrusión multimaterial permitirán aumentar la precisión y la repetitividad en la fabricación de estos composites. En términos de sostenibilidad, la incorporación de fibras biodegradables y el desarrollo de procesos de reciclaje en circuito cerrado pueden contribuir a reducir el impacto ambiental de la manufactura aditiva. Además, la estandarización de metodologías para evaluar el efecto memoria de forma (Shape Memory Effect, SME) y la integración de sensores en tiempo real serán factores clave para ampliar el rango de aplicaciones industriales de los FRTPs en impresión 4D.

Superar estos desafíos permitirá consolidar tecnologías de manufactura más eficientes, adaptativas y escalables, facilitando el desarrollo de nuevos materiales inteligentes con aplicaciones estratégicas en sectores como la industria aeroespacial, la biomedicina y la robótica blanda.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a SENACYT Panamá por su apoyo financiero y a la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la UTP por el respaldo académico e institucional. También

se agradece al CEMCIT-AIP por las contribuciones a la investigación realizada.

REFERENCIAS

- [1] S. Tibbits, "4D Printing: Multi-Material Shape Change," *Architectural Design*, vol. 84, no. 1, pp. 116–121, Jan. 2014, doi: 10.1002/ad.1710.
- [2] Y. Yu et al., "Material characterization and precise finite element analysis of fiber reinforced thermoplastic composites for 4D printing," *Computer-Aided Design*, vol. 122, p. 102817, 2020, doi: 10.1016/j.cad.
- [3] C. de Kergariou, A. Le Duigou, A. Perriman, and F. Scarpa, "Design space and manufacturing of programmable 4D printed continuous flax fibre polylactic acid composite hygromorphs," *Mater Des*, vol. 225, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111472.
- [4] T. J. R. Hughes, J. A. Cottrell, and Y. Bazilevs, "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 194, no. 39–41, pp. 4135–4195, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.cma.2004.10.008.
- [5] Y. Yu, K. Qian, H. Yang, L. Yao, and Y. J. Zhang, "Hybrid IGA-FEA of fiber reinforced thermoplastic composites for forward design of AI-enabled 4D printing," *J Mater Process Technol*, vol. 302, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117497.
- [6] H. Yang et al., "SimuLearn: Fast and Accurate Simulator to Support Morphing Materials Design and Workflows," in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA: ACM, Oct. 2020, pp. 71–84. doi: 10.1145/3379337.3415867.
- [7] R. Hague, I. Campbell, and P. Dickens, "Implications on design of rapid manufacturing," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 217, no. 1, pp. 25–30, Jan. 2003, doi: 10.1243/095440603762554587.
- [8] V. Thakur et al., "Mechanically sustainable and primary recycled thermoresponsive ABS–PLA polymer composites for 4D printing applications: Fabrication and studies," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 63, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1515/rams-2023-0149.
- [9] M. N. Ahmad et al., "Application of Taguchi Method to Optimize the Parameter of Fused Deposition Modeling (FDM) Using Oil Palm Fiber Reinforced Thermoplastic Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/polym14112140.
- [10] G. D. Goh et al., "Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics," *Mater Des*, vol. 137, pp. 79–89, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.021.
- [11] K. Dong, H. Ke, M. Panahi-Sarmad, T. Yang, X. Huang, and X. Xiao, "Mechanical properties and shape memory effect of 4D printed cellular structure composite with a novel continuous fiber-reinforced printing path," *Mater Des*, vol. 198, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109303.
- [12] A. Ghalayaniefahani, B. Oostenbrink, H. van Kasteren, and M. Mehrpouya, "4D Printing of PLA/PBS Biopolymers: Impact of Polymer Grade Variations on Thermomechanical Performance," *Adv Eng Mater*, vol. 26, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.1002/adem.202401705.
- [13] S. S. Kumar, J. S. Akmal, and M. Salmi, "4D printing of shape memory polymer with continuous carbon fiber," *Progress in Additive Manufacturing*, Dec. 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00553-1.
- [14] H. Doostmohammadi, K. Kashmarizad, M. Baniassadi, M. Bodaghi, and M. Baghani, "4D printing and optimization of biocompatible poly lactic acid/poly methyl methacrylate blends for enhanced shape memory and mechanical properties," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 160, p. 106719, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jmbbm.2024.106719.
- [15] L. Sang, F. Wang, F. Jin, F. Zhang, and W. Hou, "4D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Composites with Magneto-/Electro-Induced Shape Memory Effect," *SSRN*, Aug. 2024.
- [16] S. Vatanparast, A. Boschetto, L. Bottini, and P. Gaudenzi, "New Trends in 4D Printing: A Critical Review," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, doi: 10.3390/app13137744.
- [17] D. Fico, D. Rizzo, R. Casciaro, and C. E. Corcione, "A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials," Feb. 01, 2022, *MDPI*, doi: 10.3390/polym14030465.
- [18] S. R. Shahriar, L. Jiang, J. Park, M. S. Islam, B. Perez, and X. Peng, "Experimental and FEA Simulations Using ANSYS on the Mechanical Properties of Laminated Object Manufacturing (LOM) 3D-Printed Woven Jute Fiber-Reinforced PLA Laminates," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 4, Aug. 2024, doi: 10.3390/jmmp8040152.