

3D printing materials and functional components used in renewable energy applications

Aissa O. Muñoz-Zuñiga, MSc¹; Carlos E. Macedo-Meza, MSc²

^{1, 2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c24762@utp.edu.pe, c21167@utp.edu.pe

Abstract– 3D printing technology is revolutionizing the world as we know it. The depletion of fossil fuels, increasing energy demand and climate change are problems that demand viable and sustainable long-term solutions. Under these circumstances, the use of additive manufacturing in renewable energy presents itself as a favorable alternative to address this crisis. Therefore, the purpose of this study is to present a systematic literature review based on 3D printing materials and devices or functional components used in renewable energy applications. In order to achieve this goal, the PICOC method was employed with the final retrieval of the selection of articles through the PRISMA methodology. A total of 605 records from 4 indexed databases were identified from the search performed. The variability of materials used in 3D printing is highlighted, including polymeric materials, ceramics, metals, composites, materials of biological origin, recyclable and waste materials, where they play a transforming role in the circular economy. Also, applications of 3D printing are highlighted in devices or functional components for the use of four different renewable energies: wind, marine, bioelectrochemical and solar-electrochemical; where design and manufacturing flexibility are the main advantages exploited. Finally, the coupling of additive manufacturing to other existing and developing technologies has the capacity to drive and generate new routes towards a sustainable energy transition.

Keywords-- Functional devices or components, 3D printing, renewable energies, additive manufacturing, sustainable materials.

Materiales de impresión 3D y componentes funcionales utilizados en aplicaciones de energías renovables

Aissa O. Muñoz-Zuñiga, MSc¹; Carlos E. Macedo-Meza, MSc²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c24762@utp.edu.pe, c21167@utp.edu.pe

Resumen—La tecnología de impresión 3D está revolucionando el mundo tal y como lo conocemos. El agotamiento de combustibles fósiles, el incremento de la demanda de energía y el cambio climático son problemas que demandan soluciones viables y sostenibles a largo plazo. Bajo estas circunstancias, el uso de la manufactura aditiva en energías renovables se presenta como una alternativa favorable para hacer frente a esta crisis. Por lo cual, el propósito de este estudio es presentar una revisión sistemática de literatura basada en materiales de impresión 3D y dispositivos o componentes funcionales utilizados en aplicaciones de energías renovables. Con el objetivo de conseguir este fin, se empleó el método PICOC con la obtención final de la selección de artículos a través de la metodología PRISMA. A partir de la búsqueda realizada se identificaron un total de 605 registros provenientes de 4 bases de datos indexadas. Se resalta la variabilidad de materiales empleados en impresión 3D, incluidos materiales poliméricos, cerámicos, metales, compuestos, materiales de origen biológico, reciclables y de desecho, donde juegan un papel transformador en la economía circular. También, se destacan aplicaciones de la impresión 3D en dispositivos o componentes funcionales para el aprovechamiento entre 4 energías renovables distintas: eólica, marina, bioelectroquímica y solar-electroquímica; donde la flexibilidad de diseño y fabricación son las principales ventajas explotadas. Finalmente, el acoplamiento de la manufactura aditiva a otras tecnologías existentes y en desarrollo tiene la capacidad de impulsar y generar nuevas rutas hacia una transición energética sostenible.

Palabras clave—Dispositivos o componentes funcionales, impresión 3D, energías renovables, manufactura aditiva, materiales sostenibles.

I. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de combustibles fósiles, el incremento de la demanda de energía actual, la emisión de contaminantes, el alto grado de desechos y el cambio climático representan problemas de suma relevancia [1]. Como una alternativa viable frente a estos acontecimientos, considerables aportaciones científicas promueven la utilización de energías renovables [2]. Dentro de este contexto, la impresión 3D emerge como una estrategia ventajosa para la manufactura de componentes y estructuras complejas, caracterizada por su alta precisión y eficiencia en términos de tiempo. La aplicación del prototipado rápido se extiende a todos los sectores de la vida moderna: medicina, aeroespacial, alimentaria, textil, automotriz, ingenieril [3], construcción [4], energía y medio ambiente [5], entre otros.

Existe una diversidad de técnicas de impresión 3D. Dentro de ellas, se destacan la estereolitografía (SLA), el modelado por deposición fundida (FDM), la sinterización selectiva por láser (SLS) [6] y los procesos de bioimpresión

3D [7]. Asimismo, los principales materiales empleados en el prototipado rápido se centran en materiales poliméricos (ABS, PLA, ASA) [8], cerámicos, metálicos (Ti, Cu, Au, Ag), materiales compuestos y materiales de origen biológico (almidón, celulosa, ácido hialurónico, entre otros).

La adopción de la impresión 3D como una tecnología respetuosa con el medio ambiente ha ido evolucionando y creciendo en los últimos años. Los esfuerzos por destacar su potencial uso en aplicaciones de energías renovables son determinantes para lograr una economía circular sostenible. Por lo tanto, el presente trabajo se centra en describir los materiales y los dispositivos o componentes funcionales basados en impresión 3D que se utilicen de manera directa e indirecta en energías renovables, examinándose los últimos avances publicados y resaltándose los principales logros obtenidos.

II. METODOLOGÍA

La presente revisión sistemática de literatura tiene como objetivo exponer y analizar los principales dispositivos o componentes funcionales, fabricados mediante impresión 3D y utilizados en aplicaciones para energías renovables. Se empleó el método PICOC para la obtención final de la selección de artículos a partir de PRISMA.

La definición de la pregunta de investigación es: ¿Qué tipo de dispositivos y componentes funcionales desarrollados mediante tecnología de impresión 3D se utilizan en aplicaciones basadas en energías renovables? La búsqueda sistemática se inicia con la definición de los puntos principales utilizando el método PICOC (P: población o problema, I: intervención, C: comparación, O: resultado, C: contexto). Para cada punto, se reportan preguntas clave y palabras clave relacionadas. La sección “Población” se refiere a uso y aplicaciones de dispositivos o componentes funcionales basados en energías renovables mediante Impresión 3D. La sección “Intervención” explora las distintas técnicas de impresión 3D para evaluar cuál es la más adecuada para cada tipo de dispositivo o componente funcional en aplicaciones de energías renovables. La sección “Comparación” analiza los tipos de materiales utilizados en cada método de impresión 3D y su idoneidad en aplicaciones de energías renovables. La sección “Resultado” presenta un análisis del impacto ambiental y la sostenibilidad de los dispositivos impresos en 3D, la eficiencia energética conseguida y la viabilidad financiera de la implementación de estos dispositivos en proyectos de energías renovables. Finalmente, el apartado

“Contexto” engloba la investigación en un sector específico: Energías renovables.

Los artículos seleccionados se obtuvieron a partir de la base de búsqueda realizada desde IEE Xplore, Scopus, EBSCOhost y Web of Science. La sintaxis de búsqueda hace uso de la relación de componentes PICOC entre sí con los operadores AND y OR como se describe a continuación en cada caso:

- 1) *IEEE Xplore*: ("All Metadata": "Devices" OR "All Metadata": "Functional components" OR "All Metadata": "Device applications" OR "All Metadata": "Renewable energy" OR "All Metadata": "Sustainable energy" OR "All Metadata": "Additive manufacturing" OR "All Metadata": "3D Printing") AND ("All Metadata": "3D Printing technologies evaluation" OR "All Metadata": "Material compatibility" OR "All Metadata": "Rapid prototyping" OR "All Metadata": "3D Printing techniques" OR "All Metadata": "Performance Analysis") AND ("All Metadata": "Manufacturing methods" OR "All Metadata": "Three-dimensional printing" OR "All Metadata": "3D fabrication techniques" OR "All Metadata": "Compatible materials" OR "All Metadata": "Material suitability" OR "All Metadata": "Sustainable manufacturing" OR "All Metadata": "Green Technology") AND ("All Metadata": "Environmental impact" OR "All Metadata": "Environmental comfort" OR "All Metadata": "Sustainability" OR "All Metadata": "Energy efficiency" OR "All Metadata": "Financial viability" OR "All Metadata": "Implementation costs" OR "All Metadata": "Economic feasibility" OR "All Metadata": "Life Cycle Analysis" OR "All Metadata": "Cost-Benefit Analysis" OR "All Metadata": "Sustainable energy solutions") AND ("All Metadata": "Renewable energies" OR "All Metadata": "Eco-friendly manufacturing" OR "All Metadata": "Alternative energy sources")
- 2) *Scopus*: Al aplicar la sintaxis de búsqueda con los componentes PICOC entre sí con el operador AND, no presentó resultados que cumplieran con las palabras clave y los operadores booleanos establecido. Por lo tanto, la nueva sintaxis de búsqueda empleada considera solo los componentes PICO entre sí con el operador AND: (TITLE-ABS-KEY ("Devices" OR "Functional components" OR "Device applications" OR "Renewable energy" OR "Sustainable energy" OR "Additive manufacturing" OR "3D Printing") AND TITLE-ABS-KEY ("3D Printing technologies evaluation" OR "Material compatibility" OR "Rapid prototyping" OR "3D Printing techniques" OR "Performance Analysis") AND TITLE-ABS-KEY ("Manufacturing methods" OR "Three-dimensional printing" OR "3D fabrication techniques" OR "Compatible materials" OR "Material suitability" OR "Sustainable manufacturing" OR "Green Technology")) AND ALL= ("Environmental impact" OR "Environmental comfort" OR "Sustainability" OR "Energy efficiency" OR "Financial viability" OR "Implementation costs" OR "Economic feasibility" OR "Life Cycle Analysis" OR "Cost-Benefit Analysis" OR "Sustainable energy solutions")

techniques" OR "Compatible materials" OR "Material suitability" OR "Sustainable manufacturing" OR "Green Technology") AND TITLE-ABS-KEY ("Environmental impact" OR "Environmental comfort" OR "Sustainability" OR "Energy efficiency" OR "Financial viability" OR "Implementation costs" OR "Economic feasibility" OR "Life Cycle Analysis" OR "Cost-Benefit Analysis" OR "Sustainable energy solutions"))

- 3) *EBSCOhost*: La sintaxis de búsqueda hizo uso de la relación de componentes PICOC entre sí con el operador AND. Sin embargo, como resultado de esta, se hallaron solo 2 documentos que cumplieran con las palabras clave y los operadores booleanos establecidos. Por lo tanto, la nueva sintaxis de búsqueda empleada considera solo los componentes PICO entre sí con el operador AND: ("Devices" OR "Functional components" OR "Device applications" OR "Renewable energy" OR "Sustainable energy" OR "Additive manufacturing" OR "3D Printing") AND ("3D Printing technologies evaluation" OR "Material compatibility" OR "Rapid prototyping" OR "3D Printing techniques" OR "Performance Analysis") AND ("Manufacturing methods" OR "Three-dimensional printing" OR "3D fabrication techniques" OR "Compatible materials" OR "Material suitability" OR "Sustainable manufacturing" OR "Green Technology") AND ("Environmental impact" OR "Environmental comfort" OR "Sustainability" OR "Energy efficiency" OR "Financial viability" OR "Implementation costs" OR "Economic feasibility" OR "Life Cycle Analysis" OR "Cost-Benefit Analysis" OR "Sustainable energy solutions")
- 4) *Web of Science*: La sintaxis de búsqueda hizo uso de la relación de componentes PICOC entre sí con el operador AND. Sin embargo, como resultado de esta, solo se halló 1 documento que cumplieran con las palabras clave y los operadores booleanos establecidos. Por lo tanto, la nueva sintaxis de búsqueda empleada considera solo los componentes PICO entre sí con el operador AND: (((((ALL= ("Devices" OR "Functional components" OR "Device applications" OR "Renewable energy" OR "Sustainable energy" OR "Additive manufacturing" OR "3D Printing")) AND ALL= ("3D Printing technologies evaluation" OR "Material compatibility" OR "Rapid prototyping" OR "3D Printing techniques" OR "Performance Analysis")) AND ALL= ("Manufacturing methods" OR "Three-dimensional printing" OR "3D fabrication techniques" OR "Compatible materials" OR "Material suitability" OR "Sustainable manufacturing" OR "Green Technology")) AND ALL= ("Environmental impact" OR "Environmental comfort" OR "Sustainability" OR "Energy efficiency" OR "Financial viability" OR "Implementation costs" OR "Economic feasibility" OR "Life Cycle Analysis" OR "Cost-Benefit Analysis" OR "Sustainable energy solutions")

efficiency” OR “Financial viability” OR “Implementation costs” OR “Economic feasibility” OR “Life Cycle Analysis” OR “Cost-Benefit Analysis” OR “Sustainable energy solutions”)))

A partir de la búsqueda realizada se identificaron un total de 605 registros. IIEE Xplore (412 artículos), Scopus (52 artículos), EBSCOhost (123 resultados) y Web of Science (18 artículos). De los registros encontrados se eliminaron antes del cribado un total de 215 artículos. Las razones fueron las siguientes:

- Se excluyen documentos repetidos en las diferentes bases de datos (n=30).
- No se incluye publicaciones en idiomas diferentes al inglés y español (n=1).
- Tipo de publicación no corresponde al artículo original. No se incluyen capítulos de libros, tesis, editoriales, revistas, libros de texto universitario, ni material no indexado (n=8)
- No se incluyen documentos anteriores a 2019 (n=176).

A partir de las publicaciones recuperadas para evaluación, los criterios de inclusión y exclusión considerados se describen en el siguiente apartado.

Los siguientes puntos presentan los criterios de inclusión seleccionados:

CI 1: Los estudios deben abordar el uso y aplicaciones de dispositivos o componentes funcionales basados en energías renovables mediante impresión 3D.

CI 2: Los estudios deben incluir la exploración de técnicas de impresión 3D para evaluar cual es la más adecuada para cada tipo de dispositivo o componente funcional en aplicaciones de energías renovables.

CI 3: Los estudios deben incluir un análisis de materiales utilizados en cada método de impresión 3D y su idoneidad en aplicaciones de energías renovables.

CI 4: Los estudios deben abordar un análisis del impacto ambiental y sostenibilidad de los dispositivos impresos 3D, la eficiencia energética conseguida y la viabilidad financiera de la implementación de estos dispositivos en proyectos de energías renovables.

Los siguientes puntos presentan los criterios de exclusión seleccionados:

CE 1: Se excluyen publicaciones que se centran en aplicaciones de impresión 3D en el sector construcción.

CE 2: Se excluyen publicaciones que se centran en aplicaciones de impresión 3D en el sector medicina.

CE 3: Se excluyen publicaciones que se centran en aplicaciones de impresión 3D en otras áreas como sector espacial, automotriz, alimentos. Publicaciones relacionadas con la industria 4.0, estudios de impacto social, entre otros.

Luego de la obtención de los artículos relacionados con la pregunta de investigación, se seleccionaron 21 documentos tal como se muestra en el esquema PRISMA (Ver Fig. 1).

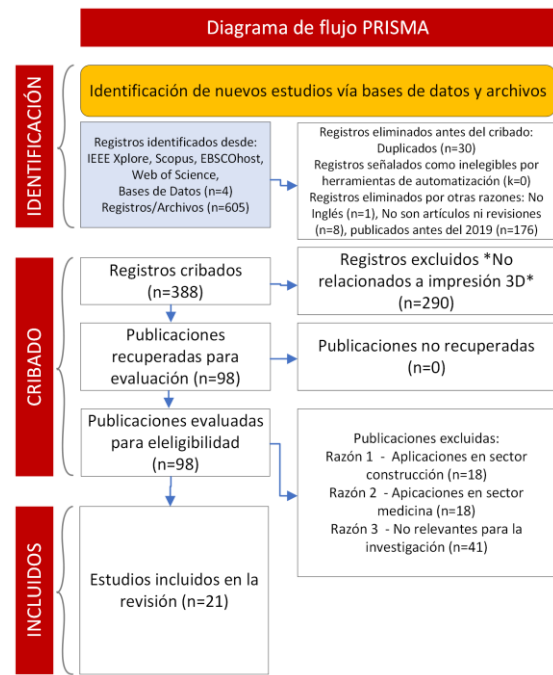


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA

Fuente: Propia

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Materiales de impresión 3D

La elección adecuada del material en la impresión 3D va más allá de la identificación de las propiedades intrínsecas de los materiales. La preferencia por uno u otro material condiciona las aplicaciones y limitaciones del producto final impreso, incluidos el costo de producción, el diseño, la velocidad de impresión, entre otras características resaltantes. Asimismo, existe una variedad muy grande de materiales empleados en la manufactura aditiva, donde destacan los materiales poliméricos como el PLA y el ABS, materiales metálicos, cerámicos, compuestos y aquellos obtenidos a partir de origen biológico. A continuación, se describe los principales materiales utilizados en el prototipado rápido, incluidos avances en materia de sostenibilidad y su aplicación en energías renovables (Ver Tabla I).

Son los polímeros desde siempre, los materiales de mayor desarrollo en la tecnología de impresión 3D. El uso del PETG (Polietileno tereftalato glicol) destaca por su accesibilidad, adecuada flexibilidad y resistencia ambiental. Según la referencia [9], se resalta el rendimiento del PETG sobre el aluminio o el acero inoxidable, donde se consiguió una eficiencia combinada del 40.8% bajo ciertas condiciones. Sin embargo, a mayores velocidades del viento, el aluminio presenta mejor comportamiento. Asimismo, en la referencia[10], se destaca el PLA conductivo como un candidato idóneo para la impresión de electrodos en PMFC dado que permite obtener geometrías complejas y adaptables optimizando el acoplamiento de las celdas, mejorando así la eficiencia de la configuración de la celda evaluada. Por otra

parte, según la referencia [11], el ABS es un material cuyas características más resaltantes son su óptima resistencia, durabilidad y efectividad en la obtención e impresión 3D de estructuras enrevesadas, utilizadas en la generación de energía marina. La capacidad de obtener un sistema electroquímico sostenible y de bajo costo, se presentó en el 2024 a partir de la fabricación de una celda electroquímica impresa con ABS donde el electrodo de trabajo y el contraelectrodo se obtuvieron en base a materiales reciclables: grafito proveniente de una batería agotada y un tornillo de acero inoxidable, respectivamente [12]. Por otro lado, en la referencia [13], se destaca el uso del PLA sobre el ABS, considerando que, aunque el PLA si emite compuestos orgánicos volátiles (COVs) durante la impresión 3D (FDM), estos valores se encuentran por debajo de los límites que generan un riesgo para la salud. Asimismo, se encontró que es posible utilizar polímeros de desecho como partes de automóviles de ABS y residuos electrónicos para crear filamentos de impresión con tolerancias similares a filamentos comerciales. Y en forma análoga, en la referencia [14], se presenta la obtención de una celda de biocombustible enzimática microfluídica miniaturizada (M-EBFC) obtenida a partir de ABS por impresión 3D que alcanzó una densidad de potencia máxima de 18 mW cm⁻². Además, se destaca el uso de electrodos de grafito de lápiz (PGE) que fueron colocados en microcanales impresos, logrando una óptima integración del sistema, donde el uso de ABS permite monitorear el flujo de fluidos en el microcanal.

En estos últimos años, se está buscando alternativas sostenibles a los materiales sintéticos de relleno convencionales sustituyéndolos por materiales impresos en 3D. En este sentido, en la referencia [15], se presenta materiales basados en PLA y reforzados con polímeros naturales, los cuáles han presentado resultados promisorios en la mejora de sus propiedades mecánicas. Se describe, por ejemplo, una mejora del 9.2% de la resistencia a la tracción, del 202% de su elongación de ruptura, del 45% de su resistencia a la flexión y del 49% de su módulo elástico al añadir nanofibras de celulosa (CNF). Asimismo, un incremento de un 215% se observó al trabajar con fibras de bambú en contraste con fibras cortas de bambú o lino. Y una mejora de 418.7% en la tenacidad de impacto al usar un 20% de residuos de café como refuerzo. En congruencia con lo descrito en el párrafo previo, en la referencia [16], se presenta una revisión sistemática de literatura que incluye el uso de polisacáridos en tintas de impresión 3D obtenidos a base de algas. Destaca su potencial como biomateriales sostenibles debido a sus propiedades físico-químicas intrínsecas (capacidad de gelificación, biocompatibilidad, biodegradabilidad y estabilidad) que dependen de la composición química de cada polímero. Su versatilidad, le brinda la capacidad de obtener materiales innovadores a partir de diferentes técnicas de impresión 3D como: FDM, DIW, SLS, SLA, DLP, sin limitarse a ellas. El alginato es utilizado en un 25% de las tintas presentadas, donde la adsorción de proteínas y adhesión celular se ve mejorada a partir de su

modificación química (acetilación). La carragenina tiene la facultad de proporcionar integridad estructural a la biotinta a partir del incremento del límite elástico de hidrogeles como es el caso del alginato. Por otro lado, el uso de diferentes biopolímeros impresos en 3D en sistemas de tratamiento y filtración de aguas residuales ha permitido, por ejemplo, el empleo de alginato con nanoarcillas irradiado con haz de electrones con una capacidad de adsorción de plomo de hasta 530 mg/g y de filtros de PLA con óxido de hierro con una capacidad de adsorción de arsénico de 129.87 mg/g. De igual forma, al emplear materiales impresos por 3D de PLA y CA, estos presentan una eficiencia superior al 90% en sistemas de separación de aceite/agua en comparación con el acero y algodón, materiales de uso tradicional [17].

La investigación en el área de materiales metálicos, compuestos y cerámicos también ha experimentado un avance continuo. En ese sentido, según la referencia [18], se resalta la fabricación y uso de imanes impresos compuestos de 75% NdFeB (Neodimio-hierro-boro) - SmFeN (Samario-hierro-nitrógeno) con Nylon 12 (aglutinante) como alternativa a los imanes de tierras raras. Se observa una mejora de su resistencia a la tracción de 32-52 MPa, lo que asegura que el material puede resistir la acción fuerzas centrífugas durante la operación del generador de turbina eólica. Por otro lado, se destaca la aplicación de técnicas de impresión como BAAM o SLS en la fabricación de componentes magnéticos y eléctricos innovadores. Asimismo, según la referencia [19], se empleó la técnica de impresión 3D SLA para la obtención de andamios 3D a partir de cristales ferroeléctricos moleculares de perclorato de imidazolio (IMC104) y un polímero fotocurable, diacrilato de polietilenglicol (PEGDA). Se destaca la capacidad de modificar hasta un 25% el módulo de Young del material cuando se ve expuesto a un incremento del campo eléctrico (0 a 2000 V/cm), capacidad fundamental en el control de vibraciones en aplicaciones de metamateriales. De forma similar, la capacidad de autoreparación frente a situaciones de fallo mecánico o degradación causada por ciclos continuos de carga eléctrica o exposición a campos eléctricos elevados, lo que podría eventualmente, mejorar la durabilidad de dispositivos o componentes empleados en energías verdes. Por otra parte, una barrera efectiva del 100% contra el macrofouling durante un lapso de tiempo de 24 meses en un entorno marino se consiguió con un filamento de PLA reforzado con 80% de partículas de cobre. Este comportamiento se relaciona directamente con el contenido de cobre propuesto. La presencia de un biofilm conformado por *Proteobacteria* en la superficie evaluada, puede contribuir a un mejor entendimiento de las interacciones que se generan en la región analizada [20]. De igual modo, en la referencia [21], se presenta el uso de la sílice como un material activo fundamental en la fabricación de baterías de iones litio (LIB), dispositivos clave en el almacenamiento de energía obtenida a partir de fuentes renovables. A su vez, se resalta el papel crítico de la viscosidad al usar sílice en la impresión 3D, donde la adición de 6% a 9% de nanopartículas de sílice permitió obtener un rango de viscosidad dinámica óptima que

varía entre 15Kcp y 25Kcp, lo que asegura la fluidez de la tinta y la estabilidad de la misma en su aplicación.

Según la referencia [22], se destaca la importancia de la distribución del tamaño de partículas de polvo en la impresión por chorro de aglutinante (BJP). El rol fundamental de la viscosidad al usar DIW e IJP, que presenta injerencia directa en el rendimiento final de los dispositivos electroquímicos. Se analizan una variedad de materiales. Se resalta, por ejemplo, el incremento de la eficiencia de las reacciones electroquímicas al usar sulfuro de molibdeno (MoS_2) y platino. La generación de patrones detallados para la detección de gases a partir de grafeno o la mejora de la conductividad iónica en celdas de combustible (SOFC) utilizando zirconia estabilizada con itrio (YSZ). De forma correspondiente, se describe el atractivo fundamental de utilizar MoS_2 en la fabricación aditiva. Se reporta la obtención de una densidad de hasta 18.43 Wh kg^{-1} y una capacidad de carga en el primer ciclo de hasta 1235 mAh g^{-1} en supercondensadores y baterías de iones de sodio, respectivamente. Además, la impresión de estructuras complejas de MoS_2 junto a sus propiedades inherentes (Por ejemplo, una alta conductividad eléctrica que varía de 10 a 100 S cm^{-1}) lo hacen destacar en sistemas de almacenamiento de energía [23]. De manera similar, según la referencia [24], se remarca la mejora en el rendimiento en la obtención de tintas para impresión 3D, donde la adición de un 2% en peso de carbón (refuerzo) en la matriz polimérica incrementa el módulo de Young hasta un 35% y un 12.5 % su resistencia a la flexión lo que promueve el uso del carbón como un material sostenible que mantiene las propiedades tixotrópicas de la tinta.

En la referencia [25], se describen una serie de materiales utilizados en impresión 3D, que incluyen materiales naturales, plásticos biodegradables, termoplásticos y termoestables que se encuentran en sincronía con el concepto de sostenibilidad y economía circular. Se destaca una velocidad de impresión alcanzada 100 veces mayor que velocidad obtenida por los métodos de manufactura aditiva tradicionales. Con la técnica de producción continua de interfaz líquida (CLIP) se alcanzó una velocidad de 3000 mm/h. Asimismo, se resalta una mejora en las propiedades mecánicas. Se obtuvo una resistencia a la tracción de 94 MPa al utilizar un material base de epoxi vitrímero y un incremento mayor al 200% en los valores de dureza, a partir de la adición de un polímero Diels-Alder en la matriz de PLA. En el mismo sentido, en la referencia [26], se describen los progresos conseguidos en materia de sostenibilidad de materiales aplicados a los procesos de SLA y DLP de impresión 3D. Se destaca el uso de materiales biobasados (biomasa lignocelulósica, aceites vegetales y productos animales) como reemplazo a las resinas comerciales tradicionales, alcanzándose una resistencia a la tracción de 83.4 MPa y una deformación a la rotura de 10.1%, valores comparables a los de la resina comercial Formlabs. Asimismo, materiales impresos con resina de sacarosa presentaron un módulo de Young de 450 Mpa a 1670 Mpa y una resistencia a la tracción de 8 Mpa a 17 Mpa en función de la composición base de la resina. El aprovechamiento de materiales

reciclados en fotopolimerización y su biodegradabilidad en la naturaleza son campos de estudio e investigación de gran relevancia para el futuro de la impresión 3D sostenible.

El empleo de materiales ecológicos y de desecho es un área potencial de investigación en la manufactura aditiva, donde se busca lograr una economía circular sostenible que se encuentra en sincronía con los índices de desempeño de sostenibilidad (SPI). De acuerdo con la referencia [27], se describe la relevancia de la impresión 3D en el reprocesamiento de compuestos de fibras de vidrio recicladas mecánicamente (GFRCS) al final de su vida útil (EoL). Se presentan valores de resistencia a la tracción mayores a 30 Mpa, los cuáles son similares a los de la resina pura y demuestran que es posible obtener estructuras impresas complejas con adecuadas propiedades mecánicas y sostenibles. Por otra parte, en la referencia [28], se pone de manifiesto la necesidad de analizar con mayor énfasis el impacto social y económico de la manufactura aditiva. Además, demuestran a partir de un análisis de caso, la reducción del impacto ambiental que se puede lograr al trabajar con materiales adecuados. Se obtuvo 22.4 mpt al utilizar ABS P430 según la metodología Eco-indicator 99. Este valor es mucho menor, comparándolo con el PLA (36.5 mpt) o PC (38.2 mpt). Finalmente, según la referencia [29], se exponen los principales SPI en la impresión 3D, destacándose la importancia de realizar una selección adecuada de materiales (PLA, ABS, Nailon, PETG, entre los más usados) y el impacto ambiental que cada uno de ellos puede generar. Asimismo, comparando la manufactura sustractiva con la aditiva, esta última presenta una mayor disminución del consumo de material y recursos. Como punto de cierre, se pone de manifiesto la relevancia de la manufactura aditiva en el campo social y económico, donde el uso de la impresión 3D permite lograr una reducción de costos, desarrollo de comunidades locales, generación de empleo e investigación e innovación.

B. Dispositivos o componentes funcionales obtenidos mediante impresión 3D usados en aplicaciones de energías renovables

El sector de las energías renovables ha hallado ventajas en la adopción de esta tecnología. En este estudio, se identificaron 4 campos de aplicación principales de energías renovables: eólica, marina, bioelectroquímica y solar-electroquímica (Ver Tabla II).

En la recuperación de energía de la fuerza del viento, se identifican los beneficios de la impresión 3D tanto para propuestas de diseño como para fabricación de componentes esenciales. Según la referencia [9], se presentaron una comparación de efectos entre álabes, para una turbina eólica tipo icewind, contruidos a partir de 3 diferentes materiales: aluminio, PETG impreso y acero inoxidable. Los álabes impresos consiguieron la mejor eficiencia combinada (eólica, mecánica y eléctrica) promedio de 25.396%. Por otro lado, en [18], se diseñaron el rotor e imanes para un aerogenerador considerando el proceso de impresión en base a imanes unidos

con polímeros. Se destaca el potencial de reducción de material de imanes de tierras raras en un 35% si el diseño emplea dos o más materiales magnéticos distintos. Por último, en la referencia [13], se identificaron un compendio de trabajos previos sobre el uso de la impresión 3D para producir partes en aplicaciones de energía eólica. Estos incluyen impresiones de: álabes de turbinas para imitar hojas de plantas mediante impresión 4D; mallas autocalentables para descongelar álabes y mejorar su rendimiento; una turbina eólica de pequeña escala funcional para uso residencial con costo de 21.63 USD; y, otra turbina pequeña de rápido prototipado.

En el aprovechamiento de energía a partir del movimiento de las olas del mar, la impresión 3D también se evidencia útil en aplicaciones a pequeña escala. En la referencia [11], construyeron un equipo de prueba que permitió la evaluación de distintos diseños impresos en 3D de rotores para una turbina tipo Wells. Estos experimentos fueron asistidos por el software Minitab 17, el que determinó a la configuración biplana del rotor como la mejor opción, logrando una potencia de salida media de 15.62 W.

En el ámbito de la bioelectroquímica, la tecnología de impresión 3D ha demostrado un potencial notable en la optimización de los sistemas de conversión de energía bioquímica a eléctrica. Rewatkar et al. emplearon esta tecnología para fabricar una celda personalizada de

biocombustible enzimático microfluídico miniaturizado (3DP-MM-EBFC). El diseño incorporó microcanales en forma de Y impresos en los bioelectrodos; y alcanzó una densidad de potencia máxima de 18 mWcm^{-2} (60 mAcm^{-2}) a 0.433 V [14]. Por otra parte, en la referencia [10], se examinaron la eficacia del apilamiento de celdas de combustible microbianas vegetales (PMFC) con conexión USB mediante electrodos impresos en 3D con Vigna radiata como planta modelo. La mejor configuración fue de celdas apiladas en 2 grupos de dos paralelos en serie (2P-S), logrando la potencia más alta de $0.42 \mu\text{W}$ y una densidad de potencia de $13.76 \mu\text{W/m}^2$. Finalmente, según la referencia [13], se identificó otro trabajo previo en relación al uso de la impresión 3D para producir celdas de combustible microbianas (MFC) y sus componentes. La impresión se dio para los ánodos de carbón poroso que permitieron un área de mayor crecimiento microbiano y, por ende, una mejor generación de energía.

El último campo impactado por la impresión 3D se reconoce en sistemas de renovación energética a partir de la radiación solar; donde no sólo se identifican los dispositivos que la convierten, sino aquellos que juegan un rol crucial en el almacenamiento eléctrico y su utilización. Zhang et al. proporcionaron una descripción general de la relación entre el proceso, la estructura y la propiedad de materiales y componentes electroquímicos en diversas aplicaciones.

Tabla 1
MATERIALES Y TÉCNICAS DE IMPRESIÓN UTILIZADAS PARA APLICACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES. FUENTE: PROPIA.

Material	Técnica de Impresión	Principales Aspectos	Campo de Aplicación (Existente/Potencial)	Ref.
PETG	FDM	El PETG es un material de fácil accesibilidad, flexible y resistente a entornos severos. Sin embargo, afecta el rendimiento de las turbinas a altas velocidades de viento debido a su menor rigidez en comparación con el aluminio o el acero inoxidable.	Eólica	[9]
PLA	FDM	Se realizó la impresión de los electrodos de celdas PMFC a partir de PLA conductivo destacándose la facilidad de imprimir geometrías complejas y personalizables como los de tipo USB.	Bioelectroquímica	[10]
ABS	FDM	Se destaca la elección de ABS en la impresión de rotores de turbina, principalmente por su capacidad de hacer frente a los esfuerzos generados mientras la turbina se encuentra en funcionamiento. Así como, en la impresión de una celda electroquímica donde los electrodos de trabajo se fabricaron a partir de grafito extraído de una batería en desuso y un tornillo de acero inoxidable	Marina Electroquímica	[11] [12]
Imanes de NdFeB + Nylon 12 Imán compuesto 75% NdFeB-SmFeN + Nylon 12. Acero eléctrico (Fe3.OSi) Acero 1020	FDM BAAM SLS	Se destaca la fabricación y uso de los imanes impresos como opción viable a los imanes de tierras raras. Donde el Nylon 12 es utilizado como aglutinante mejorando las propiedades mecánicas del material. El acero eléctrico mejora las propiedades magnéticas. El acero 1020 destaca por sus propiedades estructurales y magnéticas.	Eólica	[18]
Polisacáridos derivados de algas: A) de pared celular: Agar, Alginato, Celulosa, Carragenina, Fucoídano, Ulvanos, Porfirano, Xilano, Manano); B) de almacenamiento: Laminarina, Almidón, Almidón de Florídeas, Paramilon y Crisolaminarina	FDM DIW SLA DLP Unión: DIW+ Proceso Polyjet LOM	Características como adecuada viscosidad, gelificación, biocompatibilidad, biodegradabilidad y estabilidad entre otros aspectos son las razones por lo cual se destaca el uso de polímeros derivados de micro y macro algas como materiales base para la obtención de tintas utilizadas en impresión 3D.	Biomateriales sostenibles en energías verdes	[16]
IMC104 + PEGDA	SLA	Se empleó la impresión 3D para la obtención de metamateriales ferroeléctricos moleculares con propiedades ópticas, ferroelectricidad y capacidad de autoreparación capaces de modificar sus propiedades mecánicas bajo	Dispositivos de recolección de energía	[19]

		demanda, lo que permitiría la obtención de dispositivos adaptativos a estímulos externos.		
Quitosano PLA Alginato CA	FDM DIW SLA IP SLS	Se destaca el uso de biopolímeros junto a diferentes técnicas de impresión para la obtención de filtros de agua personalizables y reutilizables debido a su fácil procesamiento, adaptabilidad, biodegradabilidad y sostenibilidad.	Solar Eólica Sistemas de tratamiento y filtración de agua	[17]
PLA Polisacáridos: Celulosa, lignina, quitosano, hemicelulosa. Almidón, alginato. Proteínas: Queratina, gelatina, colágeno, seda, proteínas de soya Fibras vegetales; Fibras de madera, fibras de lino/bambú, fibras de cáñamo, fibras de soya, residuos de café.	FDM SLS SLA	Se resalta el uso de polímeros naturales como agentes de refuerzo en la fabricación de una matriz polimérica (PLA) obtenida a partir de la impresión 3D. Gracias a la disponibilidad, biodegradabilidad, compatibilidad y viabilidad de estos biocompuestos, se observa una mejora en las propiedades mecánicas de los objetos obtenidos por prototipado rápido, mostrándose como una elección más acertada frente a los rellenos sintético tradicionales.	Solar Biocombustibles	[15]
PLA Partículas de Cu con 30%, 50% y 80%.	FFF	Se empleó la impresión 3D para la obtención de compuestos de PLA reforzados con 30%, 50% y 80% de partículas de cobre donde la mayor composición mostró un mejor rendimiento antiincrustante (AF), evitando la proliferación de organismos en las superficies evaluadas en un ambiente marino por hasta 2 años.	Marina	[20]
Sílice de desechos (cenizas volantes) Polímeros termoplásticos: PLA, ABS, PETG Polímeros: PEDOT, PVP, CMC Óxidos metálicos: LTO, TiO ₂ , Fe ₃ O ₄ , TMOs Bsados en carbono: grafeno, grafito, CNT	Inkjet printing DIW FDM SLS SLA DLP	Se presenta el uso de la sílice como un material activo en la fabricación de baterías de LIB, y su uso en combinación con otros materiales para la obtención de tintas o filamentos de impresión 3D. Resaltándose la obtención de la misma a partir de fuentes renovables como la biomasa.	Solar Eólica Dispositivos de almacenamiento de energía	[21]
Cerámicos: Al ₂ O ₃ , YSZ, TiO ₂ , SDC. Polímeros: PEDOT:PSS, GPE, EC, PVA Metales: Ni y aleaciones de Ni, Ti y aleaciones de Ti, Pt, Cu, Au, Ag Basados en carbono: CNT, grafeno, Ti ₃ C ₂ Tx Otros: MoS ₂	BJP DIW IJP	Se presentan las principales ventajas de las técnicas de impresión 3D: BJP, DIW, IJP, y su utilización en la fabricación de componentes electroquímicos entre los que destacan: baterías, celdas de combustible, electrodos, catalizadores, supercondensadores, baterías	Solar Electroquímica	[22]
Resina fenólica termoestable (Cellobond J2027L) Carbón antracita (97.36% puro) CB pTSA	DIW	Se destaca la funcionabilidad y aplicación del carbón en la obtención de tintas para su aplicación en la impresión DIW. Permitiendo la fluidez y estabilidad de la tinta y la generación de estructuras complejas.	Sistemas de almacenamiento de energía Celdas de combsutible	[24]
ABS PGE	3DP	Se presentó una celda M-EBFC impresa, obtenida a partir de un filamento de ABS y de electrodos de PGE integrados, evaluando su funcionalidad a partir de diferentes análisis voltamétricos y mostrando la mejora en el rendimiento de la misma.	Bioelectroquímica	[14]
PLA y sus copolímeros: PLLA, PDLLA, PLGA Termoplásticos: Poliolefinas, PS, PET, PC Materiales naturales: celulosa, lignina, harina de madera PEEK Geopolímeros Resinas termoestables: acrilatos y epoxis Elastómeros con redes reversibles de Diels-Alder (p(DCPD))	FFF DIW SLS MultiJet fusión SLA DLP CLIP Inyección de aglomerante	Se expone la importancia de los polímeros en la impresión 3D y el impacto de los mismos para lograr una economía circular sostenible. Se explora la relevancia de la degradación activada, donde polímeros como p(DCPD)), vitrímeros, entre otros, se muestran como una opción acertada para trabajar con materiales que son completamente reciclables una vez terminado su ciclo de vida.	Solar Eólica Dispositivos de almacenamiento de energía	[25]
ABS PLA PC Madera Ti Polvos metálicos ABS P430	FDM SLS SLA IJP LOM EBM LENS 3DP	Se presenta una revisión sistemática de literatura en el que se describe el impacto ambiental de la impresión 3D y su relación con la sostenibilidad. Asimismo, se subraya la importancia de mayor investigación con respecto al impacto social y la rentabilidad económica en relación a la manufactura aditiva.	Solar Eólica	[28]

	Proceso de chorro aglomerante			
PLA ABS Nailon PETG Polvos metálicos	FFF SLS	Se expone los principales indicadores de desempeño de sostenibilidad y su impacto en la impresión 3D. La elección de materiales, mejora del diseño y procesos utilizados impactan directamente en el desempeño ambiental.	Solar Eólica Dispositivos de almacenamiento de energía	[29]
A) Materia prima renovable: Lignina, Celulosa, Sacarosa, CL, LA, Terpenos, Diácidos, Aceite de linaza, Aceite de Soja, Aminoácidos, Fibroína de seda, Proteínas globulares, Ácido hialurónico, Alginato y Queratina B) Materia prima desechable: Aceite de cocina usado, CO2 C) Materiales reprocesables: Termoplásticos, CANS D) Materia prima degradable: Polímeros y copolímeros	SLA DLP DLW TPP µSTL	Se destacan los principales avances obtenidos en materia de sostenibilidad con respecto a las técnicas de impresión SLA y DLP. Además, el uso de materiales renovables como materia prima en reemplazo de los polímeros termoendurecibles derivados del petróleo contribuyen a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.	Solar Eólica Biogás	[26]
PLA ABS Polímeros de desecho TiO2 Carbono Cerámicos Metales	FDM LMD SLA DLP DIW Polimerización de dos fotones	Se describe el potencial de reducción del impacto ambiental al utilizar materiales sostenibles como el PLA o polímeros de desecho. Además, se resalta la importancia de la técnica de impresión LMD, la cual facilita la reutilización de la materia prima (polveros metálicos) respecto a otras técnicas de impresión 3D.	Solar Eólica Bioelectroquímica	[13]
MoS2 PLA ABS PC Metales: Ni, Ag, Sn Materiales basados en carbono: Negro de carbón, CNF Akermanita	SLM SLS SLA SIW IJP FDM TAE HL	Se resalta el uso de MoS2 en la impresión 3D, sobre todo en la fusión de lecho de polvo basada en láser donde este material destaca por sus propiedades mecánicas, físicas y electroquímicas. Tiene la capacidad de interponer diferentes cationes como H ⁺ , Li ⁺ , Na ⁺ y K ⁺ , característica fundamental en el almacenamiento de energía.	Sistemas de almacenamiento de energía.	[23]
SR349 BDDMA GFRCs	LDM por UV	Se presenta la factibilidad de utilizar GFRC, con hasta un 45% en peso, en la obtención de tintas de impresión 3D como estrategia para promover una economía circular verde.	Eólica	[27]

En particular, se consideran aquellos dispositivos cuyas aplicaciones están relacionadas a almacenar y utilizar energía solar, o que participan en procesos catalíticos que puedan usar energía solar. Algunos ejemplos son: baterías de flujo redox de vanadio (VRFB) con electrodos compuestos de aerogel de grafeno impresos por escritura directa con tinta (DIW); micro-supercapacitores de alta capacitancia impresos con materiales compuestos PEDOT; celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) mejoradas por impresión DIW; impresión de fotocatalizadores por inyección de tinta (IJP) a base de MoS2 para producción de hidrógeno por medio de electrólisis; y, sensores de gas (e.g. basados en grafeno por DIW), de vapor (e.g. basados en polietileno por IJP) y de temperatura (e.g.

termistores basados en plata por IJP) para monitorear/optimizar sistemas de energía solar [22]. En contraste, en la referencia [13], se identificaron un compendio de trabajos previos sobre el uso de la impresión 3D para producir partes en aplicaciones de energía solar. Estos incluyen impresiones de: celdas solares con superficies flexibles; conjuntos ultrafinos de microceldas con electrodos flexibles que rinden como celdas solares tradicionales; celdas fotovoltaicas de 3 dimensiones con geometrías optimizadas para una mayor densidad de energía; y, celdas solares mediante polimerización de dos fotones (2PP) y sensibilizadas con colorante (DSSC) con diseños de dispersión de luz para una fotocorriente mejorada.

TABLA II
DISPOSITIVOS O COMPONENTES FUNCIONALES. FUENTE: PROPIA.

Campo de aplicación de energía renovable	Dispositivo o componente funcional	Material Técnica	Observaciones Significativas	Autor
Eólica	Álabes de turbina tipo icewind	PETG FDM	Los álabes impresos consiguieron la mejor eficiencia, velocidad rotacional y potencia eléctrica de salida a bajas velocidades de viento comparados con álabes de aluminio y acero inoxidable.	[9]

	Imanes permanentes de tierras raras y rotor de aerogenerador	Polvo magnético y aglutinante de nylon-12 BAM	La manufactura aditiva permitiría diseños más flexibles y una fabricación más eficiente y barata de turbinas eólicas a partir de imanes permanentes. La combinación de esos materiales también otorgaría resistencia a la corrosión.	[18]
	Álabes 4D de turbina, mallas autocalentables, y turbinas pequeñas	ABS FDM (entre otros)	El review destaca ventajas de la impresión 3D en 4 distintos trabajos en cuanto a velocidad de producción, bajo coste y capacidad de crear formas complejas, lo que respalda mejoras en las turbinas eólicas y sus piezas	[13]
Marina	Rotor y partes de turbina experimental tipo Wells	ABS FDM	Lo impreso a escala constó de soportes, abrazaderas, sujetadores, poleas, tubos de Pitot y carcasas. La impresión 3D fue fundamental para explorar diferentes diseños de manera eficiente y rápida.	[11]
Bioelectroquímica	Carcasa, microcanal para electrodos y plataforma de 3DP-MM-EBC experimental	ABS FDM	El diseño de impresión 3D es de bajo costo. El microcanal se personalizó para integrar bioelectrodos para la celda completa. Con ello, el dispositivo consigue más del doble de rendimiento.	[14]
	Electrodos en sistema experimental PMFC	PLA FDM	Los electrodos emplearon PLA conductivo y se imprimieron adoptando una interfaz tipo-USB para apilarse más fácilmente y testearse. La configuración con mejores resultados fue la de dos grupos de 2P-S	[10]
	Ánodos de MFC	Carbon FDM	El review destaca un trabajo sobre la impresión 3D de ánodos en celdas de combustión microbianas consiguiendo mejorar el rendimiento del sistema.	[13]
Solar - electroquímica	Baterías, supercapacitores, celdas de combustible, catalizadores y sensores	Cerámicos: Al ₂ O ₃ , YSZ, TiO ₂ , SDC. Polímeros: PEDOT:PSS, GPE, EC, PVA Metales: Ni y aleaciones de Ni, Ti y aleaciones de Ti, Pt, Cu, Au, Ag Basados en carbono: CNT, grafeno, Ti ₃ C ₂ Tx Otros: MoS ₂ BJP, DIW, IJP	El review destaca mejoras con la impresión 3D en: baterías (capacidad y eficiencia de descarga y conductividad), supercapacitores (capacitancia, transporte de carga, estabilidad cíclica y densidad de energía), celdas de combustible (conductividad, densidad energética, estabilidad, actividad catalítica y reducción de resistencia de polarización), catalizadores (ratio de deshidrogenación, actividad fotocatalítica, rendimiento electroquímico en la reacción de evolución de oxígeno y propiedades mecánicas), y sensores (sensado de gas CH ₄ y H ₂ , capacidad de deformación por estiramiento, sensibilidad, ajustes en espectro de color completo, y estabilidad y confiabilidad)	[22]
	Celdas solares, microelectrodos, marcos para panel	Perovskita IJP Plata IJP TiO ₂ 2PP (entre otros)	El review destaca ventajas de la impresión 3D en 4 distintos trabajos en cuanto a: estructuras flexibles, ultradelgadas, con geometrías optimizadas de 3 dimensiones; y como método alternativo de producción.	[13]

IV. CONCLUSIONES

La impresión 3D y su influencia en aplicaciones relacionadas con energías renovables ha visto un crecimiento acelerado en los últimos años. En relación a la elección de materiales, son los polímeros sintéticos (PLA, ABS, PETG) los que se utilizan en mayor grado debido a su accesibilidad, durabilidad y efectividad a la hora de obtener estructuras complejas. Asimismo, la búsqueda de materiales sostenibles y biodegradables ha presentado la utilización de polímeros naturales (celulosa, fibras de bambú, alginato, lignina, almidón entre otros) en el prototipado rápido, donde destacan además de su fácil degradación por sus propiedades mecánicas.

Por otro lado, el uso de materiales cerámicos, metálicos y materiales compuestos están experimentando una continua renovación relacionada con la aplicación final del producto obtenido y la técnica de impresión 3D empleada. Se resalta la fabricación y uso de imanes impresos compuestos de 75% NdFeB-SmFeN con Nylon 12 como alternativa a los imanes de tierras raras. El uso de la sílice como un material activo clave en la fabricación de baterías de LIB y el incremento de la eficiencia de las reacciones electroquímicas al usar sulfuro de molibdeno (Mos₂) y platino. El aprovechamiento

de compuestos de GFRCs al final de su vida útil es una línea de investigación destacada que no debe ignorarse. Por lo que, el uso de materiales y procesos sostenibles, con énfasis en la reutilización de materiales, reducción de residuos y en la mejora de la eficiencia en la producción de energía son líneas de investigación con amplio potencial de desarrollo.

Finalmente, la integración de nuevos materiales y técnicas de impresión 3D ha conseguido mejorar los rendimientos en la explotación de las energías: eólica, marina, bioquímica y solar-electroquímica. Se ha identificado que esta tecnología ha logrado: reducir costos y tiempos permitiendo evaluar varios diseños de álabes, rotores y otras piezas en turbinas; flexibilizar diseños con formas intrincadas en electrodos y ánodos para conseguir mejores resultados de rendimiento; e, incorporarse en el desarrollo y optimización de otros componentes esenciales en sistemas fotovoltaicos.

REFERENCIAS

- [1] J. Wang and W. Azam, "Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries," *Geosci. Front.*, vol. 15, no. 2, p. 101757, 2024.
- [2] A. I. Osman *et al.*, "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 741–764, 2023.

- [3] S. Rouf *et al.*, "Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications," *Sustain. Oper. Comput.*, vol. 3, pp. 258–274, Jan. 2022.
- [4] S. El-Sayegh, L. Romdhane, and S. Manjikian, "A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 2. Springer, 01-Jun-2020.
- [5] M. Ali Saqib, M. S. Abbas, and H. Tanaka, "Sustainability and innovation in 3D printing: Outlook and trends," *Clean Technol. Recycl.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–21, 2024.
- [6] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, "3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0," *Sustain. Oper. Comput.*, vol. 3, pp. 33–42, Jan. 2022.
- [7] Z. U. Arif *et al.*, "Additive manufacturing of sustainable biomaterials for biomedical applications," *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 18, no. 3. Shenyang Pharmaceutical University, 01-May-2023.
- [8] S. F. Iftekar, A. Aabid, A. Amir, and M. Baig, "Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review," *Polymers*, vol. 15, no. 11. MDPI, 01-Jun-2023.
- [9] M. C. Angeles *et al.*, "Evaluation of the Effects of Using Different Blade Material in the Performance of an Icewind Turbine," *2021 IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2021 - Proc.*, no. June, pp. 213–218, 2021.
- [10] Y. Kimura, G. A. Magdaluyo, and K. R. Pamintuan, "Stack Development and Power Generation Efficiency Analysis of 3D-Printed Plant Microbial Fuel Cells Growing Mung Beans (*Vigna Radiata*)," *2023 Int. Conf. Power Renew. Energy Eng. PREE 2023*, pp. 32–37, 2023.
- [11] R. D. Umali *et al.*, "Performance Analysis on Monoplane, Biplane, and Contra-Rotating Well's Turbine," *2020 IEEE 12th Int. Conf. Humanoid, Nanotechnology, Inf. Technol. Commun. Control. Environ. Manag. HNICEM 2020*, 2020.
- [12] L. Mara Roveda, V. Ferreira Ottoni, C. Teodoro de Carvalho, R. Rodrigues, M. Zanetti Corazza, and M. Aparecido Gonçalves Trindade, "Merging 3D-printing technology and disposable materials for electrochemical purposes: a sustainable alternative to ensure greener electroanalysis," 2019.
- [13] M. N. Nadagouda, M. Ginn, and V. Rastogi, "A review of 3D printing techniques for environmental applications," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 28, pp. 173–178, 2020.
- [14] P. Rewatkar, M. Bandapati, and S. Goel, "Miniaturized additively manufactured co-laminar microfluidic glucose biofuel cell with optimized grade pencil bioelectrodes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 59, pp. 31434–31444, 2019.
- [15] B. Sabbatini, A. Cambriani, M. Cespi, G. F. Palmieri, D. R. Perinelli, and G. Bonacucina, "An overview of natural polymers as reinforcing agents for 3D printing," *ChemEngineering*, vol. 5, no. 4. MDPI, 01-Dec-2021.
- [16] S. Mandal, G. K. Nagi, A. A. Corcoran, R. Agrawal, M. Dubey, and R. W. Hunt, "Algal polysaccharides for 3D printing: A review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 300. Elsevier Ltd, 15-Jan-2023.
- [17] N. Fijol, A. Aguilar-Sánchez, and A. P. Mathew, "3D-printable biopolymer-based materials for water treatment: A review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 430. Elsevier B.V., 15-Feb-2022.
- [18] L. Sethuraman, A. Glaws, M. Skinner, and M. P. Paranthaman, "Advanced Permanent Magnet Generator Topologies Using Multimaterial Shape Optimization and 3D Printing," in *IET Conference Proceedings*, 2023, vol. 2023, no. 17, pp. 478–485.
- [19] Y. Hu *et al.*, "A 3D-printed molecular ferroelectric metamaterial," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 117, no. 44, pp. 27204–27210, Nov. 2020.
- [20] R. Piola, M. Leary, R. Santander, and J. Shimeta, "Antifouling performance of copper-containing fused filament fabrication (FFF) 3-D printing polymer filaments for marine applications," *Biofouling*, vol. 37, no. 2, pp. 206–221, 2021.
- [21] O. J. Sanumi, P. G. Ndungu, and B. O. Oboirien, "Challenges of 3D printing in LIB electrodes: Emphasis on material-design properties, and performance of 3D printed Si-based LIB electrodes," *J. Power Sources*, vol. 543, no. July, p. 231840, 2022.
- [22] R. Zhang and T. Sun, "Ink-based additive manufacturing for electrochemical applications," *Heliyon*, vol. 10, no. 12, p. e33023, 2024.
- [23] N. Alinejadian, L. Kollo, and I. Odnevall, "Progress in additive manufacturing of MoS₂-based structures for energy storage applications – A review," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 139, no. November 2021, p. 106331, 2022.
- [24] B. Sundaravadivelan *et al.*, "Ink-Based Additive Manufacturing of a Polymer/Coal Composite: A Non-Traditional Reinforcement," *ACS Appl. Eng. Mater.*, vol. 2, no. 5, pp. 1315–1323, 2024.
- [25] G. Chyr and J. M. DeSimone, "Review of high-performance sustainable polymers in additive manufacturing," *Green Chemistry*, vol. 25, no. 2. Royal Society of Chemistry, pp. 453–466, 09-Dec-2022.
- [26] E. M. Maines, M. K. Porwal, C. J. Ellison, and T. M. Reineke, "Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes," *Green Chemistry*, vol. 23, no. 18. Royal Society of Chemistry, pp. 6863–6897, 21-Sep-2021.
- [27] A. Mantelli, M. Levi, S. Turri, and R. Suriano, "Remanufacturing of end-of-life glass-fiber reinforced composites via UV-assisted 3D printing," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 6, pp. 981–992, Jun. 2020.
- [28] R. Agrawal and S. Vinodh, "State of art review on sustainable additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 6. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 1045–1060, 21-Aug-2019.
- [29] A. Espach and K. Gupta, "Sustainability in additive manufacturing-a review," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, no. August, pp. 3210–3218, 2020.