

LA IMPRESIÓN 3D EN LA CREACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CUBESATS FRENTE A LOS MATERIALES CONVENCIONALES

3D PRINTING IN THE CREATION OF STRUCTURES CUBESATS VS. CONVENTIONAL MATERIALS

Jorge Soliz, Mishel Cuiza

Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad Privada Boliviana

jorgesoliz@upb.edu

(Recibido el 14 de mayo 2024, aceptado para publicación el 10 de agosto 2024)

RESUMEN

Con la creación del CubeSat se marcó el inicio de un creciente interés en la exploración de tecnologías espaciales. El CubeSat es una estandarización que tiene el propósito de reducir costos y tiempos de producción de satélites, permitiendo el acceso al espacio a universidades o grupos de investigación que cuentan con recursos científicos para experimentar nuevas tecnologías y facilitar la investigación aeroespacial. A lo largo de los años, se han mejorado aspectos clave, como la miniaturización de componentes, sistemas de propulsión, eficiencia energética y comunicación. Sin embargo, persisten desafíos en la robustez espacial, costos y longevidad operativa, por lo que la selección adecuada de materiales es esencial porque deben soportar las condiciones extremas del espacio. La impresión 3D ha ganado protagonismo en la industria espacial, aunque, se ha explorado su potencial en aplicaciones aeroespaciales, su adopción en CubeSats todavía enfrenta desafíos. Mediante una revisión sistemática de literatura se buscó comprender el impacto de la impresión 3D en las estructuras de CubeSats frente a materiales convencionales, comparando sus propiedades clave frente a las condiciones del espacio. Los resultados destacaron la flexibilidad y personalización que ofrece la fabricación tridimensional, pero también señalaron las ventajas de los materiales convencionales en resistencia mecánica. La fabricación aditiva está transformando la industria espacial, la elección entre la impresión 3D y materiales clásicos dependerá de las necesidades de la misión espacial.

Palabras Clave: Cubesat, Diseño Estructural, Impresión 3D.

ABSTRACT

The creation of the CubeSat marked the beginning of a growing interest in space technology exploration. CubeSat is a standardization aimed at reducing satellite production costs and lead times, enabling access to space for universities or research groups with scientific resources to experiment with new technologies and facilitate aerospace research. Over the years, key aspects such as component miniaturization, propulsion systems, energy efficiency, and communication have been improved. However, challenges persist in space robustness, costs, and operational longevity, making the proper selection of materials essential as they must withstand the extreme conditions of space. 3D printing has gained prominence in the space industry, although its potential in aerospace applications has been explored, its adoption in CubeSats still faces challenges. Through a systematic literature review, the impact of 3D printing on CubeSat structures compared to conventional materials was investigated, analyzing their key properties against space conditions. The results highlighted the flexibility and customization offered by three-dimensional manufacturing, but also underscored the advantages of conventional materials in mechanical strength. Additive manufacturing is transforming the space industry, and the choice between 3D printing and classical materials will depend on the needs of the space mission.

Keywords: CubeSat, Structural Design, 3D Printing.

1. INTRODUCCIÓN

Con la creación del modelo estándar de un CubeSat, se ha demostrado un interés creciente en explorar tecnologías innovadoras que puedan revolucionar aún más su diseño y operación [1]. Esto debido a que el objetivo principal que se quiere lograr es reducir los costos de producción y limitar el tiempo de fabricación de un satélite. Con el pasar del tiempo y el avance de la tecnología nace la necesidad de implementar mejoras en la estructura de un CubeSat para lograr que sea más resistente al entorno espacial, sea más eficiente, accesible y de facilitar su desarrollo para que muchas más personas tengan acceso a diferentes investigaciones en el área aeroespacial y desarrollar misiones espaciales más eficientes, complejas y largas [4].

A lo largo de su evolución, los CubeSats han experimentado mejoras significativas en diversos aspectos. Desde sus comienzos en los años 2000, se ha avanzado en la miniaturización de componentes electrónicos y sistemas, se han desarrollado mejores sistemas de propulsión y maniobra, mejoras en eficiencia energética y la incorporación de paneles solares [5]. Paralelamente, se han optimizado los sistemas de comunicación y en técnicas de mitigación de desechos

espaciales [2]. Si bien se han logrado avances notables en términos de miniaturización, sistemas de propulsión y comunicación, persisten preguntas abiertas sobre cómo abordar desafíos fundamentales relacionados con la robustez espacial, la eficiencia en costos y la longevidad operativa de estos dispositivos en el entorno espacial riguroso y demandante. La selección adecuada de materiales desempeña un papel de vital importancia, ya que son esenciales para asegurar el éxito de las misiones espaciales a largo plazo. Los materiales empleados no solo deben ser lo suficientemente ligeros, sino que también deben ser capaces de soportar las condiciones extremas del espacio, incluidas las fluctuaciones térmicas y las radiaciones ionizantes [6].

Uno de los desarrollos más destacados en los últimos años ha sido la implementación de la impresión 3D en diversas estructuras tecnológicas, incluyendo los CubeSats. Esta tecnología emergente está revolucionando la industria espacial al ofrecer una serie de beneficios significativos [7]. La impresión 3D permite la creación de estructuras complejas y personalizadas con un alto grado de precisión, lo que facilita el diseño y la optimización de los componentes según las necesidades específicas de cada misión. En el contexto de los CubeSats, esta flexibilidad de diseño se traduce en la capacidad de adaptar las estructuras a las exigencias del entorno espacial, ofreciendo ventajas en términos de diseño flexible, producción rápida y reducción de costos para ciertos componentes y estructuras de satélites [8].

Mediante la revisión sistemática de literatura se pretende comprender: “¿Cómo influye la impresión 3D en las estructuras de los CubeSats en términos de robustez espacial, costos, respuesta térmica, resistencia al envejecimiento, vida útil en comparación con estructuras convencionales, y sus efectos a largo plazo en fabricación y operación?”

Aunque la impresión 3D ha demostrado su potencial en diversas aplicaciones industriales y de ingeniería, hasta ahora, no se ha logrado una adopción generalizada en la fabricación de CubeSats. Si bien la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Universidad de Tokio han utilizado la impresión 3D para construir CubeSats es crucial examinar las posibles barreras, como los desafíos económicos, las limitaciones de materiales y las consideraciones de certificación. Las limitaciones de materiales son otro desafío importante. Los materiales actualmente disponibles para la impresión 3D deben cumplir con estrictos requisitos de desempeño en el entorno espacial, incluyendo resistencia a temperaturas extremas, radiación y condiciones de vacío. La investigación continua es necesaria para desarrollar y validar nuevos materiales que puedan satisfacer estas exigencias sin comprometer la integridad estructural y funcional de los CubeSats. Además, las consideraciones de certificación representan un aspecto crítico que no debe pasarse por alto. Las estructuras impresas en 3D deben pasar por rigurosos procesos de validación y certificación para garantizar que cumplen con los estándares internacionales para la misión espacial. Este proceso puede ser complejo y costoso, añadiendo una capa adicional de desafío para la adopción generalizada de la impresión 3D en la fabricación de CubeSats [9]. Por lo tanto, el presente artículo contribuye al análisis de estructuras fabricadas en 3D para el desarrollo de CubeSats, verificando de esta manera como es el comportamiento de estas estructuras frente a fenómenos espaciales.

A continuación, se procede a exponer la disposición jerárquica del presente artículo. La segunda sección tiene como objetivo presentar y examinar los conceptos esenciales relativos de los CubeSats, además de abordar las características inherentes a las estructuras convencionales. Asimismo, se dedica atención a la incorporación de la técnica de impresión tridimensional. La tercera sección se destina a la descripción de la metodología empleada en este estudio. En la cuarta y quinta sección, se procede a presentar y analizar los resultados del contenido recopilado en relación con las estructuras producidas mediante impresión 3D, evaluando sus atributos en términos de su desempeño frente a los fenómenos que caracterizan el entorno espacial. Por último, la sección conclusiva sintetizará y presentará las conclusiones resultantes del presente artículo.

▪ **CubeSats: Orígenes y estructura**

El proyecto CubeSat comenzó iniciando el año 1999 con el propósito de proporcionar un estándar para el diseño de picosatélites reduciendo costos y tiempo de desarrollo, aumentar la accesibilidad al espacio y sostener lanzamientos frecuentes. Surgió como una colaboración entre JordiPuig-Suari de la Universidad Estatal Politécnica de California, San Luis Obispo, y Bob Twiggs del Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales de la Universidad de Stanford [10], [11]. A inicios de la década de 2000 se produjo la adopción comercial de estos satélites, donde empresas como Planet Labs comenzaron a proporcionar servicios de imágenes de la Tierra y datos meteorológicos mediante el uso de estos. Los gobiernos y agencias espaciales establecieron programas para promover el desarrollo y lanzamiento de pequeños satélites con diversos fines[12].

El CubeSat es una estandarización de un satélite de 0.1 a 1 kg, con dimensiones de un cubo de 10 x 10 x 10 cm [13]. La misión principal del programa CubeSat es proporcionar acceso al espacio para cargas pequeñas para monitorear diferentes estados a su alrededor, los cuales son transmitidos a estaciones terrenas [3], [10]. El programa CubeSat no solo se enfoca en la reducción de costos, sino que también tiene un fuerte componente educativo y de desarrollo. Está diseñado para permitir que misiones espaciales sean completadas en un periodo de dos años o menos, lo que facilita la participación de estudiantes de pregrado y posgrado en el diseño, construcción y lanzamiento de estos picosatélites. Este enfoque inclusivo no solo proporciona a los estudiantes la oportunidad de experimentar con tecnologías espaciales

y obtener experiencia práctica, sino que también fomenta la innovación y el avance en el campo de la ingeniería aeroespacial [14].

La estructura de un CubeSat es uno de los componentes más críticos del diseño de un nanosatélite, debido a sus dimensiones. Durante su diseño se consideran el factor de peso, resistencia, rigidez, conductividad térmica, expansión térmica, capacidad de fabricación y costo [15], [16]. Según CalPoly, un CubeSat debe cumplir con las especificaciones definidas en el estándar que abarca requerimientos mecánicos, eléctricos, operacionales y de prueba [17]. Además de estar diseñado para soportar las vibraciones, temperaturas y choques del lanzamiento y la órbita y debe ser compatible con los diferentes tipos de desplegados. El desarrollo de un CubeSat también involucra la incorporación de varios subsistemas esenciales. Estos incluyen la carga útil, que realiza las funciones principales del satélite; el subsistema de comunicaciones, encargado de transmitir y recibir datos; el subsistema de potencia, que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del satélite; y el sistema de control de posicionamiento, que asegura que el CubeSat mantenga la orientación correcta durante su misión. Cada uno de estos subsistemas debe integrarse de manera eficiente dentro de la estructura del CubeSat para garantizar su funcionamiento óptimo y la consecución de sus objetivos de misión. En la Tabla 1 se puede observar los principales componentes de la estructura de un CubeSat y el tipo de material que se utiliza [18].

▪ **Impresión 3D en la Industria Espacial**

La impresión 3D, definida como el proceso de crear objetos físicos a partir de materiales depositados en capas según un modelo digital, ofrece una amplia gama de aplicaciones. Esta tecnología revoluciona la fabricación al reducir drásticamente el tiempo de producción, lo que implica un ahorro significativo de tiempo y costos. Además, garantiza la precisión de las piezas, superando los desafíos de los métodos tradicionales [20]. La industria aeroespacial se beneficia de la impresión 3D en siete aspectos clave: agiliza el flujo de trabajo de diseño, produce piezas más ligeras y resistentes, consolida múltiples componentes en uno, minimiza el desperdicio de materias primas costosas, acelera el tiempo de comercialización, mejora la eficiencia en costos y recursos, y optimiza el inventario y la logística [20].

TABLA 1 - CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DEL NANOSATÉLITE CUBESAT [19]

Componente	Material	Volumen Total (mm ³)	Masa Total (g)
Cuerpo Cúbico	Aluminio 6061-T6	50000	135.00
Plato Inferior	Aluminio 6061-T6	20250	54.67
Plato Superior	Aluminio 6061-T6	20000	54.00
Ejes Estructurales	Aleación Ti-6AL-4V	3200	14.17
Tapas Laterales	Cerámica	150	0.34
Anillos Retención	Aleación Ti-6AL-4V	54	0.24
Tapas Superiores	Cerámica	45	0.10
Tapas Inferiores	Cerámica	45	0.10
TOTAL	-----	93744	258.62

Las aplicaciones de la fabricación aditiva en la exploración espacial están revolucionando diversos aspectos de la industria, abriendo nuevas posibilidades para la producción de una amplia gama de componentes y estructuras. Entre las aplicaciones destacadas se incluyen la fabricación de cohetes, antenas de radio, estructuras para construcción extraterrestre, satélites, piezas de repuesto, bioimpresión y trajes espaciales [21], [22]. La capacidad de fabricar piezas a medida y en el lugar de necesidad, especialmente en el espacio, representa un avance crucial para la sostenibilidad y la viabilidad de las misiones espaciales a largo plazo. Ejemplos como SpaceX y Relativity Space ilustran cómo la impresión 3D se utiliza para fabricar componentes críticos en la industria aeroespacial, transformando el diseño y la producción de cohetes y vehículos espaciales [23], [24].

Por tal motivo, la fabricación aditiva está revolucionando la industria de los satélites al permitir la producción de componentes más ligeros y rentables, mejorando su eficiencia y fiabilidad [10]. Esta innovación posibilita la fabricación de componentes internos con geometrías complejas y alta precisión, lo que conduce a un lanzamiento de satélites más económico y eficaz; contribuye a la creación de componentes más fiables por su precisión en su fabricación, lo que reduce significativamente el riesgo de fallas durante el lanzamiento; reduce los costos de lanzamiento, ampliando el acceso al espacio y promoviendo una exploración espacial más eficiente y asequible [10]. Además, investigadores del MIT han desarrollado sensores de plasma impresos en 3D para su uso en satélites, lo que puede ser beneficioso para investigaciones como el cambio climático [25], [26]. Asimismo, su utilización para integrar sistemas propulsivos en la estructura de CubeSats, lo que abre nuevas posibilidades para la mejora de la propulsión y autonomía de estos pequeños satélites [27].

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se basó en la metodología de revisión sistemática de literatura para su desarrollo, esta misma es PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), dado que se centra en mejorar la transparencia y la reproducibilidad en las revisiones sistemáticas. Esta metodología de investigación tiene como objetivo identificar, evaluar y sintetizar de manera rigurosa y objetiva toda la evidencia relevante disponible sobre un tema específico. Se utiliza para responder preguntas de investigación de manera completa y exhaustiva, basándose en la recopilación y análisis sistemático de estudios y publicaciones previas [28]. En el marco de este estudio, se implementaron tres fases como se puede observar en la Figura 1. La primera representa la planificación de la revisión, en la segunda se realiza la revisión y la etapa final representa la presentación de los resultados obtenidos mediante un informe.

- Primera Etapa - Planificar la Revisión:** Se estableció las preguntas de investigación, el alcance de la investigación, los criterios de inclusión y exclusión, por último, la conducta de búsqueda, este último es el protocolo de búsqueda a realizar descrito en la Tabla 2. Mediante el uso de la ecuación de búsqueda se realizó la búsqueda de diferente documentación, ya que esta documentación es la población de la investigación. Sin embargo, con el uso de los elementos de la planificación de la revisión, mencionados anteriormente, se logró realiza un primer filtro a la base de datos. Contenido sobre estructura de un CubeSat, aplicación teórica y práctica de la impresión 3D en CubeSats, mejoras estructurales y características de la impresión 3D frente a fenómenos espaciales fueron los criterios de inclusión. Mientras que el contenido que sólo hablen de conceptos de un Cubesat y falta de alcance de calidad fueron los criterios de exclusión y eliminación, respectivamente.

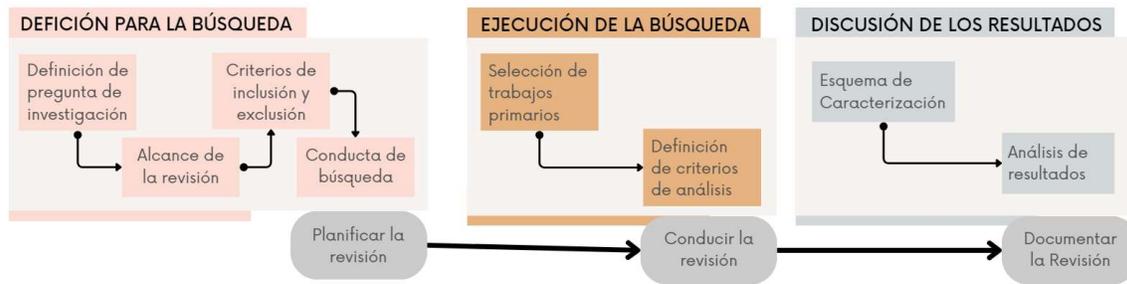


Figura 1: Etapas de la revisión sistemática de literatura.

- Segunda Etapa - Conducir la Revisión:** Luego de aplicar el filtro mencionado se lograron seleccionar diferentes publicaciones primarias. Con el propósito de analizar los trabajos primarios seleccionados, se han establecido una serie de parámetros que sirven como guía para la evaluación y comparación de dichos trabajos. Estos parámetros tienen como objetivo principal proporcionar una visión integral de los estudios primarios. Los parámetros definidos comprenden: material de filamento, resistencia térmica, resistencia a la radiación solar, baja emisión de gases y resistencia mecánica.

TABLA 2 – PROTOCOLO DE BÚSQUEDA

Protocolo de búsqueda	Descripción de detalles
Bases de datos	Google Scholar – SciElo – Elicit – IEEE
Tipo de publicación	Artículo Científicos, tesis, publicaciones en revistas científicas
Tipo de Documento	Artículos, tesis y revistas
Lenguaje	Español e inglés
Rango de fechas	2015 - 2023
Campos de búsqueda	Títulos, resúmenes y palabras clave
Términos de búsqueda	TITLE-ABS-KEY
Criterios de inclusión	Diseño estructural de CubeSats y el uso de la impresión 3D
Criterios de exclusión	Documentos que solo hablen de conceptos generales de un CubeSat
Extracción de datos	Manual y verificada utilizando una tabla de clasificación.
Análisis y síntesis	Se empleó un método Revisión Sistemática de Literatura.

- Tercera Etapa - Documentar la Revisión:** Se presentó y discutió la información primaria sobre el enfoque de la investigación. Finalmente, la presentación de resultados obtenidos de cada uno de nuestros parámetros, así como recomendaciones para futuras investigaciones. Los resultados serán presentados en diagrama de conceptos, tabla de propiedades y comparativas entre los materiales convencionales y los materiales impresos tridimensionalmente.

3. RESULTADOS

La información obtenida de la revisión sistemática de literatura muestra el uso de la fabricación aditiva en la estructura de un CubeSat frente al materiales convencionales, como ser el aluminio, proporciona un diseño muy personalizable a un costo razonable y un tiempo de respuesta rápido. Si bien existen diversos tipos de filamentos para la impresión 3D, el PLA, ABS y Nylon son tres de los materiales más utilizados en la fabricación aditiva [29]. En la Figura 2 se muestra un mapa conceptual de estos 3 filamentos, en el mismo se describe sobre este, los beneficios, desventajas y propiedades clave. Las propiedades obtenidas de cada uno de estos se pueden observar en la Tabla 3, siendo clave para verificar que pueden cumplir con las condiciones ambientales y de carga requeridas para un CubeSat, en donde destacan las propiedades de resistencia térmica, radiación solar y mecánica y baja emisión de gases.

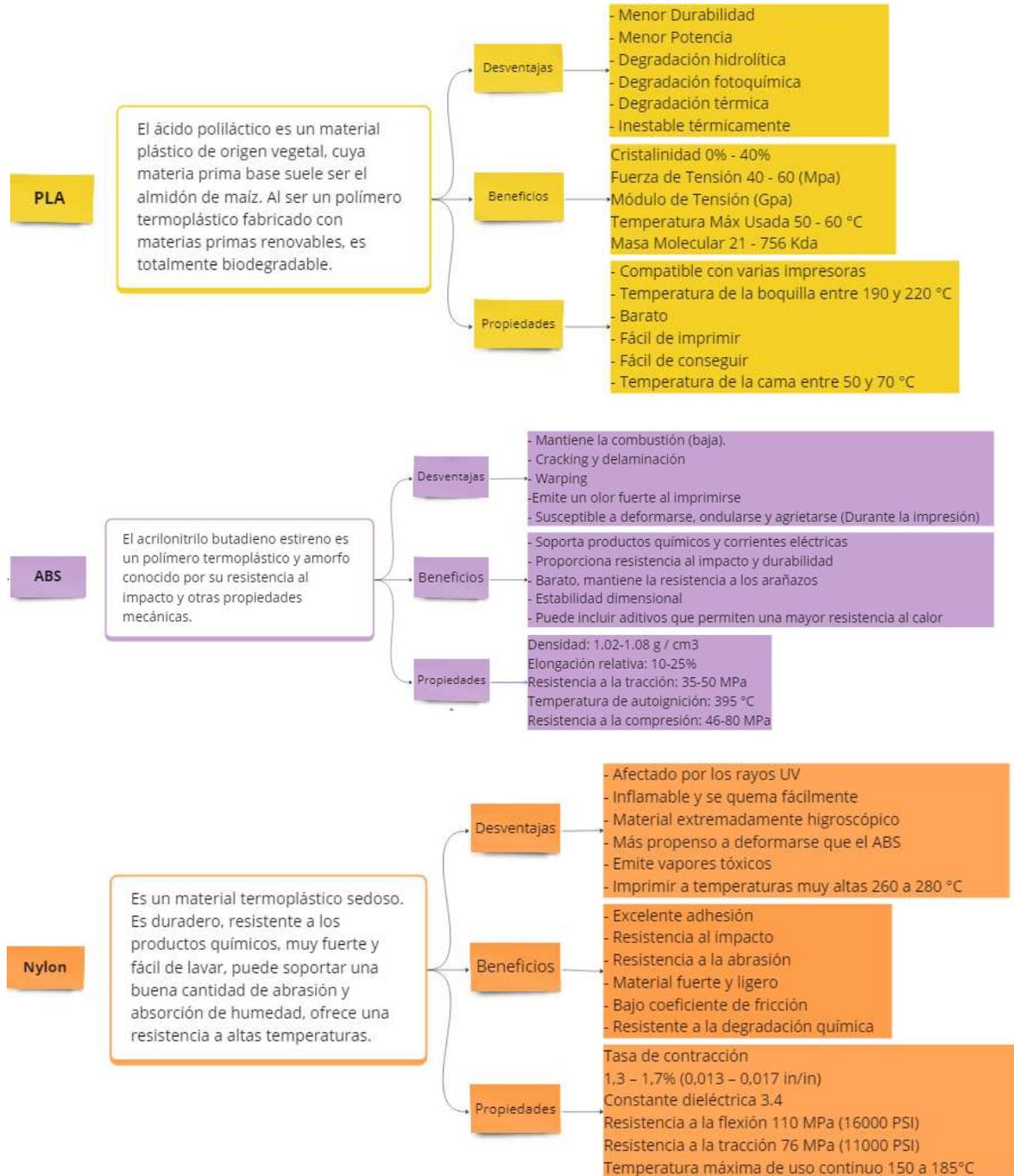


Figura 2: Mapa conceptual de PLA, ABS y Nylon [30], [31], [32].

TABLA 3 - PROPIEDADES CLAVE DEL PLA, ABS Y NYLON [33], [32], [34]

Propiedades		PLA	ABS	Nylon
Resistencia Térmica	Conductividad térmica del filamento (W/m·K)	0.13 – 0.45	0.1 - 0.2	0.2 – 0.25
	Coefficiente de expansión térmica ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	60 – 70	80 – 100	70 – 90
	Estabilidad térmica ($^{\circ}\text{C}$)	50 – 60	85-95	160 – 200
	Capacidad de disipación de calor	Limitada	Media	Buena
Resistencia a la Radiación Solar	Estabilidad bajo radiación	Baja	Baja	Media
	Degradación superficial	No	Si	Si
	Pérdida de flexibilidad	Media	Baja	Baja
	Absorción de energía solar	Baja	Baja	Media
	Color del filamento	Varios	Varios	Varios
Baja Emisión de Gases	Tasa de liberación de gases	Baja	Media	Media
	Temperatura de gases liberados	Baja	Media	Media
	Efectos en otros sistemas	No	Si	Media
	Degradación del filamento ($^{\circ}\text{C}$)	180 – 220	240	240
Resistencia Mecánica	Resistencia a la tracción (MPa)	40 – 60	35 – 50	45 – 75
	Resistencia a la compresión (MPa)	35 – 60	30 – 45	50 – 85
	Dureza (MPa)	80 - 85	60 – 105	70 – 85
	Resistencia al impacto (Kj/m^2)	5 - 13	10 – 25	45 – 105

En la Tabla 4 se muestra la comparación entre la fabricación aditiva y los materiales convencionales en términos de propiedades. Específicamente se hace una comparación entre el filamento ABS y el Aluminio 6061-T6 que es uno de los materiales más destacado de la estructura de un CubeSat. Se revela que la impresión tridimensional ofrece una mayor flexibilidad en la personalización de los componentes de CubeSats. Mientras que los materiales convencionales tienen propiedades inherentes, la impresión 3D permite ajustar las propiedades según las necesidades específicas de cada componente, lo que puede ser esencial en la fabricación de satélites a medida.

En cuanto a la resistencia mecánica, se encontró que los materiales convencionales, como el aluminio y el titanio, tienden a mostrar una mayor resistencia a la tracción y a la compresión en comparación con los materiales impresos tridimensionalmente. Sin embargo, la impresión 3D permite una mayor versatilidad en la optimización de la resistencia mecánica al ajustar la geometría interna de los componentes.

Los resultados destacan la importancia de considerar cuidadosamente las propiedades de los materiales y las ventajas específicas de la fabricación aditiva al diseñar y fabricar componentes para CubeSats. Cada material y proceso de fabricación tiene sus ventajas y limitaciones, y la elección adecuada dependerá de las necesidades específicas de la misión espacial y de los objetivos de costos y durabilidad.

TABLA 4 - COMPARACIÓN DE PROPIEDADES CLAVE DEL ABS Y MATERIALES CONVENCIONALES [32], [35]

Propiedades		ABS	Aluminio 6061-T6
Resistencia Térmica	Conductividad térmica del filamento (W/m·K)	0.1 - 0.2	205
	Coefficiente de expansión térmica ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	80 – 100	23.6
	Estabilidad térmica ($^{\circ}\text{C}$)	85-95	>200
	Capacidad de disipación de calor	Media	Excelente
Resistencia a la Radiación Solar	Estabilidad bajo radiación	Baja	Buena
	Degradación superficial	Si	No
	Pérdida de flexibilidad	Baja	No
	Absorción de energía solar	Baja	Baja
	Color del filamento	Varios	Plata
Baja Emisión de Gases	Tasa de liberación de gases	Media	No
	Temperatura de gases liberados	Media	No
	Efectos en otros sistemas	Si	No
	Degradación del filamento ($^{\circ}\text{C}$)	240	No aplica
Resistencia Mecánica	Resistencia a la tracción (MPa)	35-50	310
	Resistencia a la compresión (MPa)	30 – 45	230
	Dureza (MPa)	60 – 105	95
	Resistencia al impacto (Kj/m^2)	10 – 25	24

4. DISCUSIÓN

4.1 Diferencias entre Filamentos

De acuerdo a las propiedades descritas en la Figura 2 y Tabla 3 la elección del mejor filamento para un CubeSat debe basarse en consideraciones como las condiciones ambientales a las que estará expuesto el CubeSat, los requisitos de resistencia, peso, rigidez, flexibilidad y otros factores relevantes para la misión.

El PLA es un material fácil de imprimir y es adecuado para CubeSats que no estarán expuestos a condiciones ambientales extremas. Es ligero y tiene una buena resistencia mecánica, pero su resistencia térmica y estabilidad bajo radiación son limitadas. Es más adecuado para misiones en órbita baja de la Tierra (LEO) donde las temperaturas no son extremadamente altas. El ABS es más resistente a temperaturas elevadas y tiene una mejor resistencia térmica que el PLA. Sin embargo, puede ser más difícil de imprimir y liberar vapores irritantes durante la impresión. Puede ser una opción adecuada para misiones en LEO o más allá. El Nylon tiene una excelente resistencia térmica y es resistente al impacto, lo que lo hace adecuado para CubeSats que pueden estar expuestos a condiciones ambientales extremas.

4.2 Comparación de Resultados

El análisis de los resultados obtenidos revela diferencias significativas entre las estructuras impresas en 3D y las convencionales en términos de diversas propiedades clave. Observando las propiedades de los 3 diferentes filamentos frente al aluminio 6061-T6, mostradas en la Tabla 2 y 3, se puede afirmar que, en cuanto a la resistencia térmica, el aluminio muestra una conductividad térmica significativamente mayor, lo que sugiere una mejor capacidad para disipar el calor. Además, exhibe una estabilidad térmica superior, con una temperatura de más de 200°C. En términos de resistencia a la radiación solar, el aluminio muestra una buena estabilidad bajo radiación y ninguna degradación superficial. Mientras tanto, los filamentos muestran una resistencia baja a la radiación solar y puede experimentar degradación superficial. Esta diferencia es crucial en entornos espaciales donde la radiación solar es un factor importante. En resistencia mecánica, los filamentos son superados por el aluminio con una resistencia a la tracción mucho mayor, una resistencia a la compresión sólida y una dureza superior. Sin embargo, en resistencia al impacto, el ABS y Nylon muestran un mejor rendimiento en comparación con el aluminio. En términos de costos y robustez espacial, la impresión 3D generalmente es más rentable y puede ser más adecuada para estructuras que no requieren una resistencia extremadamente alta o que se beneficiarían de la ligereza.

4.3 Ventajas y Limitaciones de la Impresión 3D

Una de las principales ventajas radica en la capacidad de diseño personalizado y rápida iteración que brinda la tecnología de impresión 3D, lo que permite adaptar las estructuras a las necesidades específicas de la misión y optimizar la geometría para reducir el peso y maximizar la eficiencia. Además, puede reducir los costos de producción al minimizar el desperdicio de material y eliminar la necesidad de herramientas costosas. Sin embargo, existen limitaciones y desafíos, como la selección de materiales que cumplan con los rigurosos requisitos del espacio y la certificación de las estructuras impresas en 3D para su uso en misiones espaciales. La validación y la garantía de calidad son aspectos críticos que deben abordarse para garantizar la confiabilidad y la seguridad de estas estructuras en entornos espaciales hostiles.

4.4 Influencia de la Impresión 3D en las Estructuras de los CubeSats

La impresión 3D influye significativamente en las estructuras de los CubeSats en términos de robustez espacial, costos, respuesta térmica, resistencia al envejecimiento, vida útil y efectos a largo plazo en fabricación y operación, según nuestra revisión sistemática de la literatura. En cuanto a robustez espacial, aunque las estructuras impresas en 3D con filamentos como PLA, ABS y Nylon pueden optimizar la distribución de esfuerzos y reducir el peso, no alcanzan la misma resistencia mecánica que el aluminio 6061-T6, que ofrece mayor resistencia a la tracción y compresión, así como mejor estabilidad bajo condiciones extremas. En términos de costos, la impresión 3D reduce significativamente los gastos de producción al minimizar el desperdicio de material y eliminar la necesidad de herramientas costosas, permitiendo también una rápida iteración y personalización de diseños. Sin embargo, en respuesta térmica, el aluminio supera a los filamentos debido a su alta conductividad térmica y estabilidad en entornos espaciales, mientras que los filamentos muestran limitaciones, especialmente el PLA que es adecuado solo para misiones en órbita baja. La resistencia al envejecimiento y la vida útil también son áreas donde el aluminio destaca, mostrando excelente resistencia a la radiación solar y degradación mínima con el tiempo, en contraste con los filamentos que pueden deteriorarse bajo condiciones espaciales. A largo plazo, la impresión 3D ofrece ventajas en la fabricación al permitir flexibilidad y producción rápida de componentes personalizados, aunque enfrenta desafíos en la validación y certificación de estos componentes para misiones prolongadas. En resumen, aunque la impresión 3D aporta beneficios significativos en términos de costos y diseño, la robustez, respuesta térmica y durabilidad de las estructuras convencionales de aluminio siguen siendo superiores para aplicaciones espaciales exigentes.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, el análisis de las propiedades de las estructuras impresas en 3D en comparación con material convencional utilizado en CubeSats, como es en este caso el aluminio 6061-T6, arroja una serie de hallazgos significativos. Si bien este material presenta varias propiedades físicas y mecánicas superiores a los filamentos, en un futuro este puede llegar a ser reemplazado con la fabricación aditiva, ya que este se encuentra en constante desarrollo. La influencia de la impresión 3D en las estructuras de los CubeSats es valiosa ya que puede ser una herramienta para su fabricación, ofreciendo ventajas en términos de personalización y eficiencia de diseño, lo que puede mejorar la robustez espacial y reducir los costos. Sin embargo, esta influencia debe evaluarse cuidadosamente en función de las necesidades específicas de la misión y las condiciones ambientales esperadas. Además, se necesita una mayor investigación y desarrollo en la validación y la garantía de calidad de las estructuras impresas tridimensionalmente. Cada material tiene sus propias ventajas y desventajas, y la decisión debe basarse en una evaluación cuidadosa de los requisitos y restricciones del proyecto.

Para trabajos futuros, se recomienda una mayor investigación en la selección de materiales y métodos de certificación para estructuras impresas en 3D en aplicaciones espaciales. Además, es fundamental llevar a cabo pruebas adicionales para validar el rendimiento de las estructuras impresas tridimensionalmente en condiciones espaciales reales y evaluar su vida útil a largo plazo. La fabricación aditiva tiene un potencial significativo en la industria de CubeSats, y el desarrollo continuo de esta tecnología puede abrir nuevas oportunidades para misiones espaciales eficientes y personalizadas.

REFERENCIAS

- [1] N. CubeSat Launch Initiative, “CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers”.
- [2] M. L. Camacho, “Universidad Privada Boliviana, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Diseño e Implementación de la Estación Terrena UPB para Satélites Académicos Cubesats Trabajo Final de Grado”, 2022.
- [3] Y. Bohorquez, “Diseño Conceptual y Preliminar de un Cubesat de Bajo Costo”, 2018.
- [4] W.-P. Air Force Base, “Design and Testing of an Additively Manufactured Cubesat Structural Bus Air Force Institute Of Technology”.
- [5] P. Esp Lic Abelaira, A. T. SCD Karner, C. Daniel, und J. F. Kennedy, “CubeESatS: Aproximaciones, desafíos y utilidades ,La dificultad es una excusa que la historia nunca acepta”, Zugegriffen: 26. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: www.ffi.no/publikasjoner/arkiv/milspace2-bros.spectrum-monitoring-dual-satellite-system
- [6] M. Napoli und P. Papadopoulos, “The Use of Additive Manufacturing Technologies for the Design and Development of a Cubesat A project present to Master of Science in Aerospace Engineering”, 2013.
- [7] “CubeSats y el desarrollo de la impresión 3D basada en el espacio”. Zugegriffen: 26. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ts2.space/es/cubesats-y-el-desarrollo-de-la-impresion-3d-basada-en-el-espacio/>
- [8] Z. Chen und N. Zosimovych, “Mission Capability Assessment of 3D Printing Cubesats”, doi: 10.1088/1757-899X/608/1/012025.
- [9] “La Agencia Especial Europea da a conocer los CubeSat, satélites 3D en miniatura - 3Dnatives”. Zugegriffen: 26. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/es/cubesat-satelites-3d-250520172/>
- [10] Simon Lee, Amy Hutputanasin, Armen Toorian, Wenschel Lan, und Riki Munakata, “CubeSat Design Specification Rev. 12 The CubeSat Program, Cal Poly SLO CubeSat Design Specification (CDS) Document Classification X Public Domain ITAR Controlled Internal Only CubeSat Design Specification Rev. 12 The CubeSat Program, Cal Poly SLO Change History Log Effective Date Revision Author Description of Changes”.
- [11] E. F. Cruz Martínez, V. Martínez Calzada, und A. Saldaña Heredia, “Diseño Estructural de un Nanosatélite Tipo Cubesat”, *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, Bd. 9, Nr. 1, S. 45–56, Juni 2022, doi: 10.26495/icti.v9i1.2165.
- [12] “Small Satellites, Big Impact: Sustainability in the Space Economy - New Space Economy”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://newspaceeconomy.ca/2023/04/14/small-satellites-big-impact-sustainability-in-the-space-industry/>
- [13] Gauthier Pierlot, “Oufti-1 : flight system configuration and structural analysis.”, 2009.
- [14] R. Nugent, R. Munakata, A. Chin, R. Coelho, und J. Puig-Suari, “The CubeSat: The picosatellite standard for research and education”, *Space 2008 Conference*, 2008, doi: 10.2514/6.2008-7734.
- [15] M. Cihan, A. Cetin, M. O. Kaya, und G. Inalhan, “Design and analysis of an innovative modular cubesat structure for ITU-pSAT II”, in *RAST 2011 - Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 2011, S. 494–499. doi: 10.1109/RAST.2011.5966885.
- [16] “Vista de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistema de paneles solares del CubeSat Colombia 1”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6381/7900>

- [17] “Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería Diseño y fabricación de una estructura para un CubeSat 1U”.
- [18] “Todo lo que siempre quisiste saber sobre la estructura de un CubeSat”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=1348>
- [19] “Análisis de resistencia estructural en el diseño de un nanosatélite CubeSat”. Zugegriffen: 30. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.redalyc.org/journal/614/61459623007/html/>
- [20] “Impresión 3D Aeroespacial | Dassault Systèmes”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/3d-printing-aerospace>
- [21] “Infografía: La impresión 3D en el espacio - 3Dnatives”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/es/infografia-impresion-3d-espacio-190120232/#!>
- [22] “La impresión 3D revoluciona el sector espacial – BSDI”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://bsdies.com/impresion-3d-sector-espacial/>
- [23] “La innovación de la impresión 3D en la carrera espacial”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.whatsnews.com/2023/05/06/la-innovacion-de-la-impresion-3d-en-la-carrera-espacial/>
- [24] “La revolución de la impresión 3D en la carrera espacial”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.turismodeestrellas.com/impresion-3d-industria-aeroespacial>
- [25] “Los satélites estarán equipados con sensores de bajo coste impresos en 3D | gadget.com”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://gadget.com/es/151692-los-satelites-estaran-equipados-con-sensores-de-bajo-coste-impresos-en-3d/>
- [26] “El ingenioso método del MIT para tener satélites más baratos: sensores impresos en 3D”. Zugegriffen: 1. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.espanol.com/omicono/tecnologia/20220806/ingenioso-metodo-mit-satelites-baratos-sensores-impresos/554694904_0.html
- [27] “Planetary Resources utiliza la impresión 3D para sus proyectos de minería”. Zugegriffen: 31. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://impresiontresde.com/planetary-resources-utiliza-en-la-impresion-3d-para-sus-proyectos-de-mineria-de-asteroides/>
- [28] D. Tranfield, D. Denyer, und P. Smart, “Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review”.
- [29] “Comparativa entre el PLA, el ABS y el nylon”. Zugegriffen: 1. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://markforged.com/es/resources/blog/pla-abs-nylon>
- [30] “Material ABS: una guía de creación rápida de prototipos | Blog rápido directo”. Zugegriffen: 3. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/gu%C3%ADa-de-materiales-abdominales/>
- [31] “PLA vs ABS vs PETG: Las Diferencias. – IDEA161”. Zugegriffen: 3. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://idea161.org/2021/06/08/pla-vs-abs-vs-petg-las-diferencias/>
- [32] “Todo sobre el Nylon (PA). Propiedades, Cómo Usar y las Mejores Marcas”. Zugegriffen: 2. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://descubrearduino.com/nylon-impresion-3d/>
- [33] “PLA y PETG: características, diferencias y aplicaciones”. Zugegriffen: 2. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://abax3dtech.com/2020/12/15/pla-y-petg-caracteristicas-diferencias-y-aplicaciones/>
- [34] “Filamento ABS 750 gr para impresión 3D”. Zugegriffen: 2. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://3dlaboratorio.es/plastic-abs.htm>
- [35] “Aluminio, Información técnica, historia y propiedades · Alu-Stock S.A.” Zugegriffen: 3. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/el-aluminio/>