



PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA
SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE
ISSN: 3072-8452

**DISEÑO CIRCULAR Y
MANUFACTURA DIGITAL
PARA EL DESARROLLO DE
MOBILIARIO MODULAR:
SISTEMA ENSAMBLADO SIN
HERRAMIENTAS MEDIANTE
PANELES ENTRELAZADOS**

*CIRCULAR DESIGN AND DIGITAL
MANUFACTURING FOR MODULAR
FURNITURE: A TOOL-FREE INTERLOCKING
PANEL SYSTEM*

AUTOR

**VLADIMIR BECERRIL
MENDOZA**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
BAJA CALIFORNIA, FACULTAD
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍA
MÉXICO

Diseño Circular y Manufactura Digital para el Desarrollo de Mobiliario Modular: Sistema Ensamblado sin Herramientas Mediante Paneles Entrelazados

Circular Design and Digital Manufacturing for Modular Furniture: A Tool-Free
Interlocking Panel System

Vladimir Becerril Mendoza

vladimir.becerril@uabc.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5202-6681>

Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y
Tecnología
Baja California - México

Artículo recibido: 13/07/2026

Aceptado para publicación: 16/08/2026

Conflictos de intereses, agradecimientos y financiamiento. El autor declara no tener conflictos de intereses relacionados con la realización, interpretación o publicación de este estudio. Se agradece la colaboración de los estudiantes participantes y de las personas coinventoras, así como el acompañamiento del Departamento de Propiedad Intelectual y Transferencia de Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California durante el proceso de protección de la propiedad intelectual y transferencia tecnológica del desarrollo.

Esta investigación recibió financiamiento mediante el proyecto institucional de la Universidad Autónoma de Baja California No. 351/6/C/28/24, titulado *Economía circular en el diseño de muebles de madera para atención a necesidades de población vulnerable*, así como de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a través del proyecto CBF-2025-G-1153, titulado *Generación de tecnologías para el aprovechamiento integral de residuos maderables en la industria del mueble mediante diseño circular y manufactura mixta*.

RESUMEN

Se presenta el diseño y la validación de un sistema de mobiliario modular ensamblado sin herramientas mediante paneles entrelazados, desarrollado bajo principios de diseño circular y manufactura digital. El problema de investigación radica en la dependencia de herrajes metálicos, adhesivos y configuraciones multimaterial en el mobiliario convencional, lo cual incrementa la complejidad del ensamblaje, dificulta los procesos de reciclaje y limita su integración en modelos de economía circular. En este contexto, se propone un sistema estructural basado en geometrías de ensamble que permite la unión de paneles rígidos sin el uso de componentes externos. La metodología integra un proceso de diseño estructurado en cuatro fases: investigación, conceptualización, fabricación y validación, complementado con un enfoque experimental. El sistema fue desarrollado mediante modelado digital y fabricado mediante maquinado Control Numerico Computarizado utilizando tableros a base de madera. Para su validación se desarrollaron un modelo conceptual, un prototipo funcional y una producción piloto de 20 unidades, evaluadas en condiciones reales mediante pruebas de ensamblaje, desempeño estructural, aprovechamiento del material y percepción del usuario. Los resultados muestran un tiempo de ensamblaje inferior a cinco minutos, un desempeño estructural satisfactorio durante las pruebas funcionales, un aprovechamiento del material del 87 % y una aceptación alta de los usuarios. Se concluye que el sistema constituye una alternativa viable para el desarrollo de mobiliario sostenible, con potencial para la manufactura, la transferencia tecnológica y su implementación en contextos educativos, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la innovación, la producción y consumo responsables y la educación de calidad.

Palabras clave: diseño circular, mobiliario modular, manufactura digital

ABSTRACT

This study presents the design and validation of a modular furniture system assembled without tools through interlocking panels, developed under the principles of circular design and digital fabrication. The research addresses the dependence of conventional furniture on metal fasteners, adhesives, and multi-material configurations, which increase assembly complexity, hinder recycling processes, and limit integration into circular economy models. In response, a structural system based on interlocking geometries is proposed to join rigid panels without the use of external fastening components. The methodology followed a four-phase design process consisting of research, conceptualization, manufacturing, and validation, complemented by an experimental approach. The system was developed through digital modeling and manufactured using Computer Numerical Control (CNC) machining on wood-based panels. Validation included the development of a conceptual model, a functional prototype, and a pilot production of 20 units, which were evaluated under real operating conditions through assembly tests, structural performance assessment, material utilization analysis, and user perception. The results demonstrated an assembly time of less than five minutes, satisfactory structural performance during functional testing, 87% material utilization, and a high level of user acceptance. The proposed system represents a feasible alternative for the development of sustainable furniture, with potential applications in manufacturing, technology transfer, and educational environments. Furthermore, the proposed approach contributes to the achievement of the Sustainable Development Goals related to industry and innovation, responsible production and consumption, and quality education.

Keywords: circular design, modular furniture, digital manufacturing

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de mobiliario sostenible se ha consolidado como una línea estratégica dentro del diseño industrial y la ingeniería de productos, debido a la necesidad de reducir los impactos ambientales generados durante su producción, uso y disposición final, estudios recientes señalan que el modelo lineal de producción y consumo continúa en la industria mueblera, favoreciendo una alta dependencia de recursos naturales y una limitada recuperación de materiales (Palos-Cerda et al., 2025). El fenómeno del fast furniture ha incrementado significativamente el volumen de residuos sólidos y el consumo acelerado de materiales, evidenciando la necesidad de incorporar estrategias basadas en economía circular y análisis del ciclo de vida (Costa, 2023). En Latinoamérica, además, los procesos de transformación de madera generan importantes cantidades de retales, aserrín y residuos lignocelulósicos que frecuentemente son desaprovechados, representando una pérdida de valor material y un impacto ambiental adicional (Pascuaza Rivera & López, 2013). Estas problemáticas han impulsado el desarrollo de estándares internacionales, como la norma ANSI/BIFMA e3-2024, “Furniture Sustainability Standard” orientados a evaluar la sostenibilidad ambiental del mobiliario durante todo su ciclo de vida (BIFMA, 2024).

Como respuesta a estas problemáticas, los sistemas de mobiliario modular y de empaque plano han adquirido relevancia por su capacidad para reducir el volumen de transporte, facilitar el ensamblaje y favorecer estrategias de reutilización. Diversos sistemas de mobiliario modular han sido desarrollados mediante geometrías de acoplamiento orientadas a simplificar el ensamblaje y reducir los tiempos de armado. Este interés también se refleja en el ámbito de la propiedad intelectual. Por ejemplo, la patente de Davis (2013) propone un sistema de paneles ensamblables sin herramientas mediante mecanismos de unión específicos; la patente US 20160174700 A1 incorpora elementos internos de refuerzo para incrementar la estabilidad estructural (Brandenberg, 2016); mientras que la patente de Culp y Gentle (2010) presentan soluciones basadas en uniones mecánicas desmontables. Aunque estas propuestas representan avances importantes, continúan dependiendo de componentes adicionales o configuraciones estructurales que incrementan la complejidad del sistema, limitando la eficiencia del desmontaje y la optimización del material.

Investigaciones recientes sobre Design for Disassembly (DfD) destacan que la prolongación de la vida útil del mobiliario depende de sistemas completamente desmontables, reparables y reutilizables (Sydor & Stańczyk, 2025). En este contexto, el diseño circular propone incorporar

desde las primeras etapas del desarrollo estrategias orientadas a la reutilización, reparación, actualización y optimización del ciclo de vida de los productos (Manzini, 2015; Burkut, 2025). No obstante, la implementación de estos modelos continúa enfrentando limitaciones relacionadas con la trazabilidad de materiales, la disponibilidad de información y la incorporación de herramientas digitales, particularmente en pequeñas y medianas empresas del sector mueblero (Imbesi et al., 2026; Palos-Cerda et al., 2025). En consecuencia, la modularidad y el diseño para desmontaje constituyen estrategias fundamentales para favorecer la transición hacia modelos de economía circular.

La manufactura digital es una herramienta estratégica de competitividad, particularmente mediante tecnologías Diseño Asistido por Computadora (CAD), Manufactura Asistida por Computadora (CAM) y maquinado CNC, ha transformado los procesos contemporáneos de diseño y fabricación de mobiliario al permitir mayores niveles de precisión, automatización y personalización. Estudios recientes evidencian que la integración de herramientas de modelado paramétrico, fabricación digital y geometría computacional facilita el desarrollo de sistemas estructurales complejos optimizando simultáneamente el uso de materiales y los procesos de fabricación (Aidinli et al., 2025; Yuan et al., 2025; Zhang & Zhu, 2026). Estas tecnologías favorecen además la producción distribuida y la fabricación bajo demanda, aspectos estrechamente vinculados con los principios de economía circular.

A partir de este contexto surge la siguiente pregunta: ¿es posible desarrollar un sistema de mobiliario modular que elimine el uso de herrajes y herramientas sin comprometer su comportamiento estructural, la eficiencia del aprovechamiento del material y la aceptación por parte del usuario? Se plantea como hipótesis que un sistema basado en geometrías de ensamblaje entrelazadas puede sustituir los elementos de fijación convencionales mediante mecanismos de bloqueo geométrico, facilitando simultáneamente el ensamblaje, el desmontaje y la reutilización de los componentes.

El objetivo de esta investigación es diseñar y validar un sistema de mobiliario modular ensamblado sin herramientas mediante paneles entrelazados, evaluando su desempeño mediante pruebas de ensamblaje, comportamiento estructural, aprovechamiento del material y percepción del usuario. Con ello se busca aportar evidencia sobre la viabilidad técnica de integrar diseño modular, diseño circular y manufactura digital en el desarrollo de mobiliario sostenible, fortaleciendo las posibilidades de manufactura, transferencia tecnológica y formación académica en diseño industrial. La investigación contribuye y se enmarca en los

principios establecidos por la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas, particularmente en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (Industria, innovación e infraestructura), al incorporar procesos de manufactura digital e innovación tecnológica; el Objetivo 12 (Producción y consumo responsables), mediante estrategias de optimización material, desmontaje y diseño circular; y el Objetivo 4 (Educación de calidad), al promover el desarrollo de herramientas didácticas y proyectos de aprendizaje vinculados con el diseño industrial y la manufactura sostenible (Rosas Burgos et al., 2026; ONU, 2015).

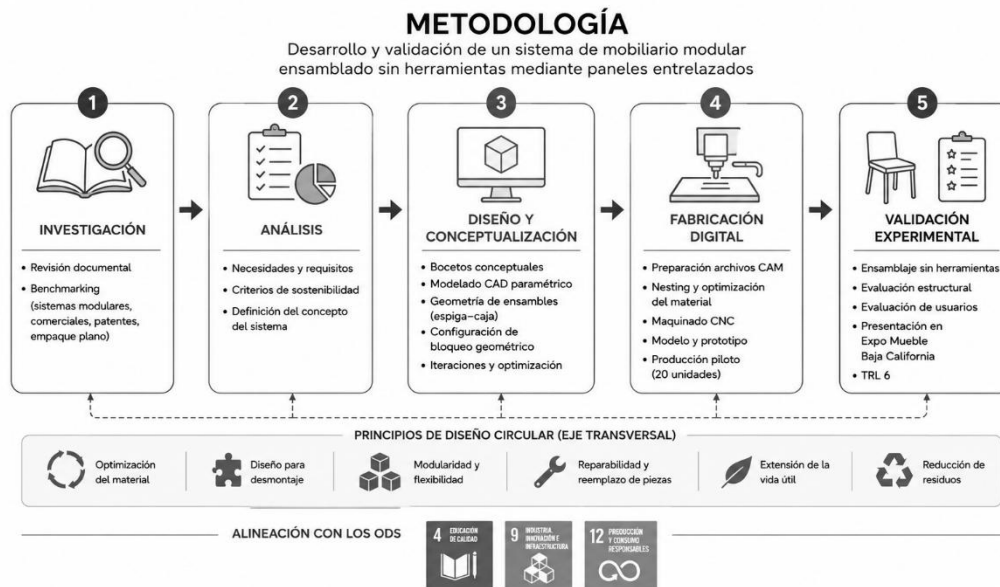
METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado con orientación tecnológica y un diseño descriptivo con validación experimental, integrando principios de diseño circular y manufactura digital para el desarrollo de un sistema de mobiliario modular ensamblado sin herramientas mediante paneles entrelazados, orientada al diseño, fabricación y evaluación de una solución tecnológica.

El diseño circular constituyó el eje transversal de la investigación, para el desarrollo del sistema hacia criterios de desmontaje, modularidad, optimización del uso de materiales, reducción de componentes y potencial de reutilización, orientado a favorecer estrategias de producción y consumo responsables durante el ciclo de vida del producto.

La metodología se estructuró en cinco etapas secuenciales: investigación, análisis, diseño y conceptualización, fabricación digital y validación experimental (Figura 1).

Figura 1. Metodología y proceso de diseño, fabricación y validación del sistema de mobiliario modular



Fuente: elaboración propia.

En la etapa de investigación se realizó una revisión documental de literatura científica, normas técnicas y antecedentes tecnológicos relacionados con diseño modular, diseño circular, mobiliario sostenible, manufactura digital y diseño para desmontaje (Design for Disassembly). Paralelamente, se revisaron antecedentes de propiedad intelectual asociados con sistemas de ensamble para mobiliario modular y soluciones de empaque plano. Durante la etapa de análisis se efectuó un estudio comparativo (benchmarking) de sistemas de mobiliario existentes, considerando criterios funcionales, estructurales, productivos y de sostenibilidad. Este análisis permitió establecer los requerimientos de diseño del sistema propuesto. En la etapa de diseño y conceptualización se desarrollaron modelos digitales mediante software CAD, definiendo geometrías de ensamble basadas en uniones tipo espiga-caja y mecanismos de bloqueo geométrico. El proceso incluyó iteraciones sucesivas para verificar la compatibilidad geométrica de las piezas, las tolerancias de fabricación y la secuencia de ensamblaje. La etapa de fabricación digital comprendió la preparación de archivos de manufactura, el anidado digital (nesting) de las piezas y el maquinado mediante router CNC sobre tableros a base de madera. Finalmente, la etapa de validación experimental consistió en la evaluación funcional del sistema mediante pruebas de ensamblaje, observación del comportamiento estructural, análisis del aprovechamiento del material y evaluación de la percepción del usuario.

El desarrollo comprendió la elaboración de un modelo conceptual, un prototipo funcional y una producción piloto fabricados mediante router CNC sobre tableros a base de madera. Para ello se empleó software CAD para el modelado tridimensional y software CAM para la generación de trayectorias de corte y estrategias de anidado (nesting), optimizando la distribución de las piezas sobre el tablero.

La validación experimental se realizó mediante la fabricación y evaluación de una producción piloto del sistema modular. Las pruebas se desarrollaron en el taller de manufactura digital de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California.

La evaluación de ensamblaje se realizó con estudiantes universitarios seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los participantes no contaban con experiencia profesional en carpintería o manufactura de mobiliario, con el propósito de reducir posibles sesgos derivados de habilidades técnicas especializadas. Como complemento, se realizaron entrevistas semiestructuradas con tres fabricantes de mobiliario para obtener observaciones técnicas relacionadas con el potencial de manufactura y transferencia tecnológica del sistema.

La evaluación del sistema incluyó el registro del tiempo de ensamblaje, la observación del comportamiento estructural durante el armado y uso funcional, el análisis del aprovechamiento del material derivado del proceso de manufactura mediante un cuestionario de percepción integrado por cinco preguntas con escala tipo Likert de cinco niveles para valorar la facilidad de ensamblaje, estabilidad, funcionalidad y aceptación general del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se presentan siguiendo las cinco etapas metodológicas del estudio, mostrando la evolución del sistema desde su concepción hasta su validación tecnológica. En cada apartado se analizan los hallazgos obtenidos y se contrastan con investigaciones previas sobre diseño modular, manufactura digital y diseño circular.

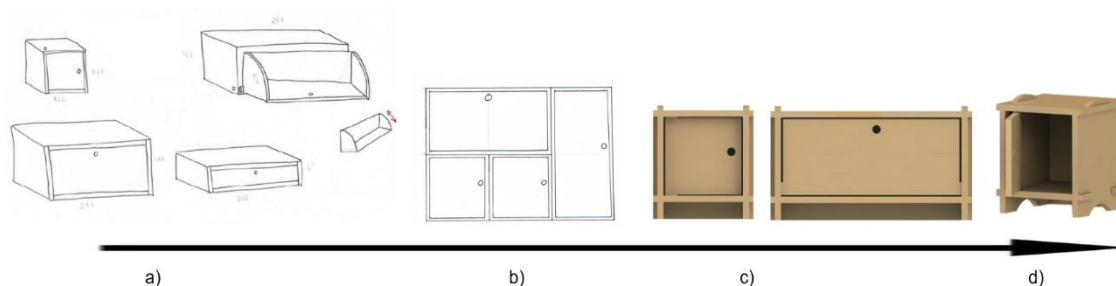
Desarrollo del sistema de ensamble mediante diseño digital

El desarrollo del sistema inició con la definición conceptual de un mobiliario modular cuyo principio de diseño consistió en reducir al mínimo el número de componentes necesarios para conformar un contenedor funcional. A partir de este criterio se diseñó un sistema capaz de

integrar los elementos básicos presentes en el mobiliario de almacenamiento, tales como superficies de apoyo, compartimentos interiores, repisas, puertas y cajones, manteniendo una configuración estructural simplificada y compatible con procesos de manufactura digital.

La modularidad del sistema se estableció mediante tres configuraciones geométricas básicas: un módulo cúbico, un módulo vertical y un módulo horizontal (Figura 2). Estas configuraciones comparten componentes estructurales comunes y fueron diseñadas para acoplarse entre sí mediante geometrías localizadas en las superficies superior e inferior de cada módulo, formando un sistema de apilamiento que restringe el desplazamiento lateral sin requerir elementos adicionales de fijación. Esta estrategia permite generar diferentes configuraciones espaciales a partir de un conjunto reducido de componentes, favoreciendo la adaptabilidad del mobiliario a distintos requerimientos de uso.

Figura 2. Evolución del concepto de diseño (del boceto al modelo CAD), (a) bocetaje, (b) modularidad, (c) modelado CAD y (d) simulación



Fuente: elaboración propia.

El principio de unión entre paneles se desarrolló mediante un sistema de ensamble entrelazado basado en uniones tipo espiga-caja. Cada panel incorpora dos espigas y dos cajas, configuración que restringe la rotación relativa entre las piezas y mejora la estabilidad del conjunto durante el ensamblaje. El sistema incorpora además una pieza llave, introducida como último elemento de la secuencia de armado, cuya función es bloquear el movimiento de los paneles e impedir su desensamble involuntario. De esta forma, el ensamble completo se realiza mediante un movimiento de deslizamiento, eliminando la necesidad de utilizar tornillos, adhesivos o herrajes metálicos.

Con el propósito de maximizar la superficie útil del mobiliario, la cubierta superior fue resuelta mediante dos paneles independientes que, una vez ensamblados, conforman una superficie continua equivalente al ancho y profundidad del módulo. Asimismo, los mecanismos de

apertura para puertas y cajones fueron integrados dentro de la propia geometría del sistema, utilizando una combinación de espigas rectas y cajas con perfil circular que permiten el movimiento de rotación controlado sin incorporar bisagras ni correderas comerciales.

El desarrollo geométrico del sistema se realizó mediante modelado paramétrico utilizando SolidWorks®, empleando variables globales para controlar dimensiones generales, espesores del material y proporciones de cada módulo. Este enfoque permitió escalar el diseño a diferentes formatos sin modificar la lógica constructiva del sistema. El entorno CAD también se utilizó para validar virtualmente las secuencias de ensamblaje, verificar interferencias entre componentes y evaluar el funcionamiento de los mecanismos de apertura antes de la fabricación física de los prototipos (Figura 3).

Figura 3. Modelado CAD y detalle del sistema espiga-caja y de la pieza llave



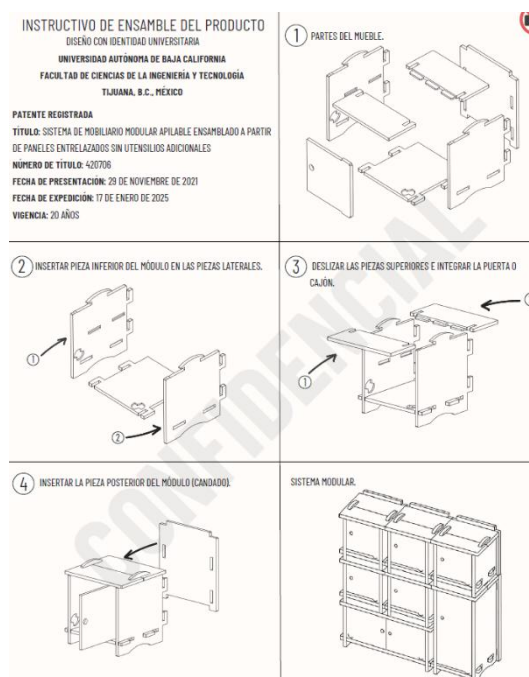
Fuente: elaboración propia.

El proceso de desarrollo comprendió al menos cinco iteraciones de diseño, orientadas principalmente al ajuste de parámetros dimensionales y funcionales del sistema. Los cambios más relevantes correspondieron a: i) la longitud de las espigas, para facilitar el proceso de inserción y proporcionar una holgura adecuada durante el ensamblaje; ii) el rediseño del zócalo superior de la pieza llave, que además de bloquear el sistema funciona como elemento de acoplamiento entre módulos apilados; y iii) la modificación de los ángulos de cierre de las cajas circulares empleadas en los mecanismos, permitiendo controlar el rango de rotación requerido para puertas y cajones.

Como resultado de esta etapa se obtuvo un sistema modular integrado por componentes comunes capaces de generar configuraciones cúbicas, verticales y horizontales, manteniendo

compatibilidad dimensional entre los distintos módulos. El sistema incorpora secuencias de ensamblaje simplificadas de seis pasos para el módulo con puerta (Figura 4), conformado por siete piezas, y de diez pasos para el módulo con cajón, integrado por once piezas. Asimismo, la configuración de empaque plano reduce el volumen ocupado durante el transporte respecto al mobiliario ensamblado, favoreciendo la eficiencia logística del sistema.

Figura 4. Descripción de número de piezas, pasos de ensamblaje, dimensiones y funciones



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, como parte del proceso de desarrollo se realizó una búsqueda del estado de la técnica mediante la revisión de sistemas comerciales, antecedentes científicos y documentos de propiedad intelectual relacionados con mobiliario modular, mecanismos de ensamblaje y soluciones de empaque plano. Este análisis permitió identificar características diferenciales del sistema propuesto y respaldó la definición de los elementos considerados novedosos para su posterior protección mediante patente (Becerril Mendoza et al., 2025).

Uno de los resultados derivados del desarrollo geométrico del sistema fue la obtención de una configuración de empaque plano (flat-pack), en la que todos los componentes del mobiliario pueden desmontarse y apilarse sobre un mismo plano sin requerir elementos adicionales de fijación. Esta configuración reduce significativamente el volumen ocupado durante el almacenamiento y transporte, favoreciendo la eficiencia logística del sistema y su compatibilidad con modelos de manufactura distribuida (Figura 5).

Figura 5. Ejemplo del empaque plano, elaborado con cartón reciclado



Fuente: elaboración propia.

reducción volumétrica se determinó comparando el volumen externo del mobiliario completamente ensamblado con el volumen correspondiente al conjunto de paneles apilados, considerando únicamente las dimensiones exteriores del paquete generado por las piezas desmontadas. En ambos casos se emplearon las dimensiones máximas de almacenamiento, sin considerar espacios vacíos internos del mobiliario.

Para el módulo cúbico, el volumen del mobiliario ensamblado corresponde aproximadamente a 0.028 m^3 (equivalente a 1 pie^3), mientras que en configuración de empaque plano el volumen ocupado por las piezas apiladas se reduce a aproximadamente 0.007 m^3 (432 in^3), lo que representa una reducción cercana al 75 % del volumen de almacenamiento.

En los módulos vertical y horizontal, cuyo volumen ensamblado corresponde aproximadamente a 0.057 m^3 (2 pies^3), la configuración de empaque plano reduce el volumen hasta aproximadamente 0.014 m^3 (864 in^3), manteniendo el mismo principio de apilamiento de paneles y permitiendo una disminución equivalente del volumen requerido para transporte y almacenamiento.

Esta reducción volumétrica constituye una consecuencia directa del sistema de ensamble desarrollado, ya que la eliminación de herrajes, bisagras y otros componentes externos permite que todas las piezas se desmonten completamente y se acomoden de forma compacta sobre un único plano. Desde la perspectiva del diseño circular, esta característica favorece no solo la

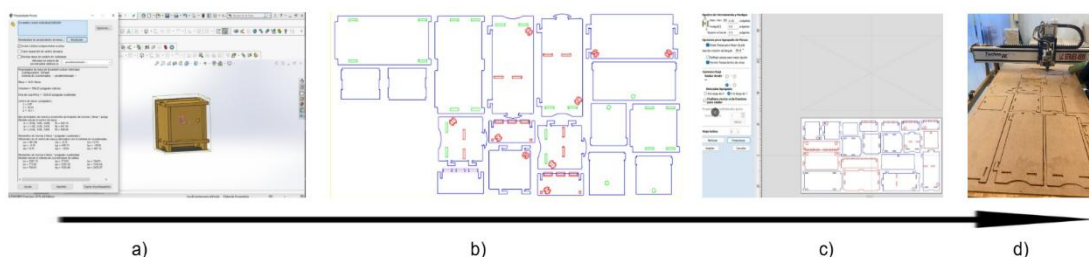
optimización logística, sino también la distribución, el almacenamiento, el mantenimiento y la reutilización de los componentes durante el ciclo de vida del producto.

Los resultados obtenidos son consistentes con los principios del flat-pack furniture, donde la reducción del volumen de transporte constituye una de las principales ventajas competitivas frente al mobiliario convencional. Sin embargo, a diferencia de muchos sistemas comerciales que dependen de herrajes metálicos y accesorios para su montaje, el sistema propuesto integra el mecanismo de unión directamente en la geometría de los paneles. Esta solución permite conservar las ventajas logísticas del empaque plano e incorporar, simultáneamente, principios de diseño para desmontaje y modularidad (Sydor & Stańczyk, 2025; Burkut, 2025).

Desarrollo del prototipo mediante manufactura digital

Una vez validado el sistema de ensamble mediante modelado digital, los archivos CAD desarrollados en SolidWorks® fueron exportados en formato DXF para su procesamiento en el software CAM Aspire®, donde se definieron las trayectorias de herramienta, el material de trabajo y las operaciones de maquinado requeridas para la fabricación del prototipo (Figura 6).

Figura 6. Flujo CAD–CAM–CNC, (a) modelado en SolidWorks®, (b) archivos DXF, (c) operaciones de maquinado en Aspire® y (d) maquinados en Router CNC



Fuente: elaboración propia.

El prototipo se fabricó utilizando un tablero de MDF de 19.05 mm (3/4 in) de espesor, con dimensiones comerciales de 1.22 × 2.44 m (4 × 8 ft). Para el proceso de corte se empleó una fresa recta de 6.35 mm (1/4 in) de diámetro, de dos filos y carburo de tungsteno (Amana oTool®), adecuada para operaciones de maquinado sobre tableros derivados de la madera.

El proceso de manufactura se estructuró en tres operaciones principales (Figura 6 (b)):

Vaciado (Pocketing): utilizado para generar las cavidades donde se alojan las repisas y los mecanismos de rotación correspondientes a puertas y cajones.

Perfilado interno (Inside Profile): empleado para fabricar las cajas de ensamble, los alojamientos de las espigas y los orificios que funcionan como jaladeras integradas.

Perfilado externo (Outside Profile): destinado a obtener el contorno final de cada panel y definir la geometría exterior de todas las piezas del sistema.

La distribución de las piezas sobre el tablero se realizó mediante el algoritmo automático de anidado (nesting) incorporado en Aspire®. Para garantizar la correcta sujeción mecánica del tablero durante el maquinado, se estableció un margen perimetral de 25.4 mm (1 in) respecto al borde exterior y una separación mínima entre piezas de 31.75 mm (1.25 in).

En esta primera etapa únicamente se fabricaron 16 piezas, suficientes para configurar alternativamente los tres módulos desarrollados (cúbico, vertical y horizontal), permitiendo verificar la compatibilidad dimensional entre componentes, el correcto funcionamiento del sistema de ensamble y la modularidad propuesto. Bajo estas condiciones se obtuvo un aprovechamiento del material del 76 %, correspondiente a la distribución parcial de las piezas sobre un único tablero.

El tiempo promedio de maquinado fue de 8 minutos para el módulo cúbico con puerta, 14 minutos para el módulo vertical y 16 minutos para el módulo horizontal. Estas diferencias estuvieron asociadas principalmente al número de componentes y a la longitud total de las trayectorias de herramienta requeridas para cada configuración.

El prototipo fabricado permitió evaluar por primera vez el comportamiento físico del sistema y detectar oportunidades de mejora que no fueron evidentes durante el modelado digital. Entre las principales observaciones destacó el elevado peso del conjunto, atribuido a la densidad del MDF y al espesor seleccionado para esta primera versión. Asimismo, durante las pruebas de ensamblaje se identificó la conveniencia de incorporar un redondeo en todas las aristas expuestas de los paneles, con el propósito de mejorar la seguridad del usuario, la calidad percibida y el acabado estético del mobiliario.

Las pruebas de ensamblaje del prototipo registraron tiempos de 3, 5 y 5 minutos para los módulos cúbico, vertical y horizontal, respectivamente, considerando el tiempo total requerido para completar el armado sin herramientas. El módulo horizontal presentó la mayor

complejidad de ensamblaje debido a la incorporación simultánea de dos puertas dentro del sistema.

Los resultados obtenidos durante esta etapa condujeron a una segunda iteración del diseño, en la que se sustituyó el tablero de MDF por contrachapado (plywood) de 12.7 mm (1/2 in) de espesor, buscando reducir el peso total del mobiliario sin modificar la lógica estructural del sistema de ensamble. Paralelamente, se incorporó un redondeo uniforme en el perímetro de todas las piezas, mejorando la ergonomía, la seguridad durante la manipulación y la calidad visual del producto final.

Desde la perspectiva del desarrollo de producto, la construcción del prototipo representó una etapa de aprendizaje fundamental, ya que permitió identificar aspectos relacionados con la selección del material, la ergonomía y la facilidad de ensamblaje que difícilmente pueden evaluarse únicamente mediante modelos digitales. Este proceso iterativo coincide con los enfoques de diseño asistido por manufactura digital descritos por Aidinli et al. (2025) y Zhang y Zhu (2026), quienes mencionan la importancia de combinar validación virtual y prototipado físico para optimizar el desempeño funcional de productos fabricados mediante tecnologías CNC.

Validación funcional del sistema modular

Concluida la etapa de prototipado, el sistema fue sometido a una revisión del diseño, incorporando los ajustes dimensionales y constructivos identificados durante la evaluación preliminar. Las modificaciones incluyeron la actualización del material, el refinamiento de detalles geométricos y la mejora de aspectos ergonómicos del sistema de ensamble, permitiendo iniciar una producción piloto de veinte unidades destinadas a verificar la repetibilidad del proceso de manufactura y la compatibilidad dimensional del sistema modular.

La fabricación se realizó utilizando tableros contrachapados de primera calidad de 12.7 mm (1/2 in) de espesor, con recubrimiento en chapa natural de encino americano y parota, materiales seleccionados por ofrecer una mejor relación entre peso, resistencia mecánica y calidad superficial respecto al MDF empleado durante la fabricación del primer prototipo. Esta modificación permitió mantener la geometría del sistema de ensamble sin alterar la forma constructiva desarrollada durante el diseño digital.

Las condiciones de maquinado establecidas durante la fabricación del prototipo se conservaron para la producción piloto, manteniendo los parámetros de corte, avance y herramienta. En consecuencia, los tiempos de maquinado por módulo permanecieron similares a los registrados durante la etapa de prototipado. Sin embargo, el incremento en el volumen de producción permitió optimizar la distribución de las piezas mediante estrategias de anidado digital (nesting), considerando además la orientación de la veta del tablero para conservar continuidad visual entre puertas, superficies y paneles laterales. Como resultado, el aprovechamiento del material aumentó del 76 %, obtenido durante la fabricación del prototipo, al 87 % en la producción piloto.

La producción de veinte unidades permitió verificar la repetibilidad dimensional de las piezas, la compatibilidad entre componentes compartidos y la correcta configuración de los tres módulos desarrollados (cúbico, vertical y horizontal). Asimismo, se confirmó la intercambiabilidad de diversos paneles entre las diferentes configuraciones del sistema, validando uno de los principios de modularidad establecidos durante el proceso de diseño. La reducción del espesor del tablero, el cambio de material y el redondeo perimetral de todas las piezas contribuyeron a obtener un mobiliario con menor peso, mejor acabado superficial y mayor seguridad durante su manipulación, sin afectar el funcionamiento del sistema de ensamble.

Desde la perspectiva del diseño circular, la fabricación de una serie piloto permitió comprobar que el sistema puede producirse utilizando componentes estandarizados y compartidos entre diferentes configuraciones, reduciendo la diversidad de piezas y favoreciendo procesos de producción, mantenimiento y reposición. Estos resultados coinciden con los planteamientos sobre modularidad, así como con investigaciones recientes que destacan la integración de manufactura digital y diseño para desmontaje como estrategias para incrementar la flexibilidad y sostenibilidad del desarrollo de productos (Aidinli et al., 2025; Sydor & Stańczyk, 2025).

Evaluación por usuarios

Con el propósito de complementar la validación funcional del sistema, se realizó una evaluación con tres grupos de usuarios que permitieron analizar diferentes perspectivas del mobiliario desarrollado: i) estudiantes universitarios que participaron en pruebas de ensamblaje y usabilidad; ii) usuarios potenciales que visitaron el proyecto durante Expo Mueble Baja California; y iii) fabricantes de muebles con experiencia en procesos de diseño y producción,

quienes aportaron observaciones de carácter técnico relacionadas con el desarrollo del producto.

Evaluación de usabilidad

La primera fase de evaluación se realizó con 20 estudiantes universitarios, con edades comprendidas entre 19 y 21 años, quienes no habían tenido contacto previo con el sistema de mobiliario. Cada participante recibió un instructivo ilustrado que describía el proceso de ensamblaje mediante una secuencia gráfica de cinco pasos.

Los tiempos promedio de ensamblaje fueron de 1 a 2 minutos para el módulo cúbico y de 3 a 5 minutos para los módulos vertical y horizontal. El incremento observado en estos últimos estuvo relacionado con el mayor número de componentes y con la incorporación simultánea de puertas dentro del proceso de armado.

Durante las pruebas de usabilidad los participantes identificaron de manera consistente que la pieza llave, incorporada como último componente del ensamblaje, constituye el elemento responsable del bloqueo final del sistema y de la estabilidad percibida del mobiliario. Asimismo, destacaron como una característica diferenciadora la posibilidad de ensamblar y desmontar el producto sin utilizar herramientas, señalando que esta condición facilitaría su transporte, almacenamiento y reutilización.

En relación con el mecanismo de apertura de las puertas, los participantes comprendieron su funcionamiento mediante la rotación generada por la propia geometría de las piezas, identificándolo como una alternativa al empleo de bisagras convencionales. Como sugerencia de mejora, varios participantes propusieron incorporar un sistema de cerradura para aplicaciones donde fuera necesario restringir el acceso al contenido del mobiliario.

Evaluación de usuarios potenciales

La segunda etapa de evaluación se desarrolló durante Expo Mueble Baja California, donde el sistema fue exhibido como parte del espacio universitario “Diseños con Identidad Universitaria”.

Los visitantes manifestaron interés principalmente por tres características del sistema: el uso de un único material estructural, la posibilidad de ensamblar el mobiliario sin herramientas y

la capacidad de ampliar el sistema mediante la combinación de módulos de diferentes configuraciones. Estas características fueron asociadas por los usuarios con facilidad de transporte, flexibilidad de uso y posibilidades de crecimiento del mobiliario.

Como parte de la exhibición se permitió que algunos visitantes interactuaran directamente con el módulo cúbico. Los participantes que aceptaron realizar el ensamblaje completaron la actividad en tiempos comprendidos entre 1 y 3 minutos. Durante esta interacción se observó que la principal dificultad consistió en insertar la pieza llave antes de completar la secuencia de armado, situación que ocasionó solicitudes de apoyo por parte de algunos usuarios. Esta observación sugiere la conveniencia de reforzar el diseño del instructivo o incorporar elementos visuales que faciliten la comprensión de la secuencia de ensamblaje.

Finalmente, diversos visitantes expresaron posibles escenarios de aplicación del sistema, mencionando su utilización en estudios de trabajo, oficinas y habitaciones, lo que evidencia una apropiación inicial del producto y una percepción favorable respecto a su versatilidad.

Evaluación por fabricantes de mobiliario

Durante la misma exposición se realizaron entrevistas semiestructuradas con tres fabricantes de muebles, quienes evaluaron el sistema desde una perspectiva técnica y productiva.

Las primeras observaciones estuvieron orientadas hacia aspectos relacionados con la viabilidad industrial del desarrollo, incluyendo pruebas de resistencia, costos de producción, modelo de negocio y posibilidades de comercialización. Aunque algunos de estos aspectos no formaban parte de los objetivos del presente estudio, sí fue posible proporcionar información relativa al aprovechamiento del material, tipo de tablero empleado, peso, dimensiones generales, modularidad del sistema y posibilidades de desarrollar nuevas configuraciones utilizando el mismo principio de ensamble.

Entre las principales recomendaciones técnicas destacó la necesidad de analizar el comportamiento del mecanismo de rotación durante ciclos prolongados de uso, debido al posible desgaste generado por el contacto continuo entre las superficies de madera. En este sentido, los fabricantes sugirieron evaluar futuras modificaciones tanto en la geometría del mecanismo como en la selección del material empleado para incrementar su durabilidad.

La evaluación con los tres grupos de participantes permitió analizar el sistema desde perspectivas complementarias. Mientras que los estudiantes universitarios validaron principalmente la facilidad de ensamblaje y la comprensión del sistema constructivo, los usuarios potenciales aportaron información relacionada con la aceptación del producto y sus posibles contextos de uso. Por su parte, los fabricantes concentraron sus observaciones en aspectos asociados con la factibilidad de producción, la durabilidad del sistema y las oportunidades de transferencia tecnológica.

Transferencia tecnológica y nivel de madurez tecnológica del sistema

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema evidenciaron un proceso continuo de innovación tecnológica que trascendió el diseño conceptual del mobiliario, permitiendo integrar actividades de diseño, manufactura, validación funcional, evaluación de usuarios y protección de la propiedad intelectual. Este proceso permitió consolidar una solución tecnológica con potencial de aplicación industrial y transferencia hacia el sector productivo.

El proceso de protección intelectual inició con el análisis de la propuesta como un posible diseño industrial, debido a que la innovación parecía centrarse en la configuración formal y la apariencia derivadas de la integración entre la modularidad y el sistema de ensamble. Sin embargo, durante la revisión realizada por la Oficina de Propiedad Intelectual y Transferencia de Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), se identificó que la principal aportación del desarrollo correspondía al funcionamiento del sistema constructivo y a los mecanismos de ensamble propuestos.

Posteriormente, se evaluó la posibilidad de proteger la invención mediante la figura de modelo de utilidad; sin embargo, el análisis de la memoria técnica permitió determinar que la innovación incorporaba características funcionales, estructurales y de aplicación industrial que justificaban su protección como patente de invención. Como resultado de este proceso, el desarrollo fue protegido mediante la patente denominada “Sistema de mobiliario modular apilable ensamblado a partir de paneles entrelazados sin utensilios adicionales”, registrada ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) el 17 de enero de 2025.

La protección obtenida comprende el sistema de ensamble, los mecanismos de bloqueo geométrico y la configuración modular que permiten el armado del mobiliario sin utilizar herrajes, adhesivos ni herramientas. Asimismo, el principio constructivo desarrollado demostró

ser escalable hacia otras tipologías de mobiliario, permitiendo su aplicación en propuestas como bancas, camas y cómodas, conservando la misma lógica estructural y de ensamblaje.

Como parte del proceso de transferencia tecnológica, la producción piloto fue presentada durante Expo Mueble Baja California, estableciendo un espacio de interacción entre la universidad, fabricantes de mobiliario, diseñadores y usuarios potenciales (Figura 7). La retroalimentación obtenida permitió identificar oportunidades de mejora, posibles aplicaciones comerciales y alternativas de colaboración entre la academia y el sector industrial, fortaleciendo el potencial de transferencia del sistema desarrollado.

Figura 7. Exhibición de la producción piloto, en Expo Mueble 2025



Fuente: elaboración propia.

Desde la perspectiva del desarrollo tecnológico, la investigación permitió alcanzar un Nivel de Madurez Tecnológica TRL 6, correspondiente a la demostración de un prototipo funcional en un entorno relevante de operación. Este nivel de madurez se sustentó en cuatro procesos complementarios de validación desarrollados a lo largo de la investigación que se presentan en la Tabla 1, la validación técnica, la validación productiva, la validación por los usuarios y la validación de transferencia.

Tabla 1. Procesos de validación del sistema para el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL 6)

TIPO DE VALIDACIÓN	ACTIVIDADES Y EVIDENCIAS
Validación técnica	Diseño paramétrico, verificación virtual de ensambles y optimización iterativa de la geometría de las uniones.
Validación productiva	Fabricación digital de prototipos/piloto (CNC), verificación de repetibilidad, compatibilidad dimensional y optimización del aprovechamiento del material.

Validación con usuarios	Pruebas de ensamblaje, evaluación de usabilidad y análisis de percepción (estudiantes, usuarios potenciales, fabricantes).
Validación de transferencia	Protección de propiedad intelectual, exhibición en entorno representativo del sector mueblero e identificación de oportunidades de escalamiento industrial.

Fuente: elaboración propia.

En conjunto, estas evidencias demuestran que el desarrollo no se limitó a la generación de un prototipo funcional, sino que integró un proceso completo de investigación, desarrollo e innovación que permitió verificar la viabilidad técnica, productiva y tecnológica del sistema propuesto.

Integración de los principios de diseño circular

De manera transversal, el diseño circular constituyó el marco conceptual que orientó las decisiones adoptadas durante todas las etapas de la investigación. Los resultados obtenidos muestran que los principios de circularidad fueron incorporados tanto en el diseño del sistema como en su proceso de fabricación y validación (Tabla 2).

Tabla 2. Principios de diseño circular en el sistema de mobiliario desarrollado

PRINCIPIO DE DISEÑO CIRCULAR	EVIDENCIA OBTENIDA DURANTE LA INVESTIGACIÓN
Diseño para desmontaje	Sistema de ensamble sin herramientas mediante paneles entrelazados.
Modularidad	Configuración adaptable mediante módulos cúbico, vertical y horizontal con componentes compartidos.
Optimización del material	Estrategias de anidado (nesting) mediante manufactura CNC, alcanzando un aprovechamiento del material del 87 %.
Reparabilidad	Sustitución individual de paneles sin afectar el resto de la estructura.
Manufactura distribuida	Fabricación mediante procesos digitales CNC compatibles con producción descentralizada.
Extensión de la vida útil	Sistema reconfigurable, desmontable y adaptable a diferentes configuraciones de mobiliario.

Fuente: elaboración propia.

Esta integración fortalece la contribución del estudio al demostrar que el diseño industrial puede abordarse como un proceso sistemático de investigación y desarrollo tecnológico, donde la validación experimental y la transferencia del conocimiento forman parte del propio proceso

de diseño. En este sentido, el sistema desarrollado no solo representa una propuesta de mobiliario modular, sino un modelo metodológico para la generación de innovaciones orientadas a la manufactura sostenible, en concordancia con los principios del diseño circular y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 4, 9 y 12.

CONCLUSIÓN

La presente investigación permitió demostrar que es posible desarrollar un sistema de mobiliario modular ensamblado sin herramientas mediante paneles entrelazados, manteniendo un comportamiento funcional adecuado y compatibilidad con procesos de manufactura digital. Los resultados obtenidos confirman la hipótesis de que un sistema basado en geometrías de ensamble y mecanismos de bloqueo puede sustituir elementos convencionales de fijación, como tornillos, adhesivos y herrajes metálicos, facilitando el ensamblaje, el desmontaje y la reconfiguración del mobiliario sin comprometer su funcionamiento.

La principal contribución del estudio consiste en integrar, dentro de un mismo proceso de investigación, principios de diseño modular, diseño circular y manufactura digital para el desarrollo y validación de un sistema de mobiliario. A diferencia de investigaciones centradas únicamente en el diseño conceptual o en la evaluación de materiales, se presenta el diseño paramétrico, la fabricación mediante CNC, la producción piloto, la validación funcional, la evaluación con usuarios y la protección de la propiedad intelectual. Esta integración aporta evidencia sobre la viabilidad de metodologías de desarrollo tecnológico aplicadas al diseño industrial. La obtención de una patente y la evaluación del sistema en un entorno representativo del sector mueblero respaldan el nivel de madurez tecnológica alcanzado y evidencian oportunidades para su escalamiento hacia aplicaciones industriales.

Los resultados obtenidos también muestran que el diseño circular puede incorporarse como un eje transversal del proceso de desarrollo de productos. Los principios de diseño para desmontaje, modularidad, optimización del material, reparabilidad, manufactura distribuida y extensión de la vida útil fueron considerados desde las primeras etapas del diseño y posteriormente verificados durante la fabricación y validación experimental. En este sentido, el trabajo contribuye a los objetivos de sostenibilidad al proponer una estrategia de desarrollo de mobiliario alineada con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 4 (Educación de calidad), fortaleciendo la vinculación entre investigación, innovación y formación en diseño industrial

REFERENCIAS

- Aidinli, K., Minaoglou, P., Kyratsis, P., & Efkolidis, N. (2025). *Computational furniture design case studies*. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D*, 87(3), 319–328.
- Becerril Mendoza, V., Rosas Burgos, V. K., López Albarrán, P., & Rosel Solís, M. J. (2021). *El diseño de mobiliario de madera fabricado por router CNC*. *Actas de Diseño*, 37, 249-243.
- Becerril Mendoza, V., Rosel Solís, M. J., Martínez Clavel, M. J., Hernández Ferrusca, E., & López Albarrán, P. (2025). *Sistema de mobiliario modular apilable ensamblado a partir de paneles entrelazados sin utensilios adicionales (Patente mexicana No. MX/a/2021/014625)*. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Brandenberg, C. B. (2016). *Furniture article with concealed storage and removable panels* (U.S. Patent Application Publication No. US 2016/0174700 A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://ppubs.uspto.gov/>
- Business and Institutional Furniture Manufacturers Association. (2024). *ANSI/BIFMA e3-2024 furniture sustainability standard*. BIFMA.
- Burkut, E. B. (2025). *Circular design strategies in interior architecture: Rethinking furniture design through reuse, recycling, and waste materials*. *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8(2), 456–470. <https://doi.org/10.33725/mamad.1754189>
- Costa, C. M. V. S. da. (2023). *Sustainable furniture design for domestic buildings (Master's thesis)*. University of Lisbon.
- Culp, S. A., & Gentle, T. W. (2010). *Modular assembly system* (U.S. Patent No. 7,856,772 B1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US7856772B1/en>
- Davis, C. (2013). *Knock down furniture with locking joints* (U.S. Patent No. 8,590,976 B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US8590976B2/en>
- Imbesi, L., Baiani, S., Lucibello, S., Panizzi, E., Altamura, P., Malakuczi, V., D'Elia, L., Rotondi, C., Ershova, M., Rossini, G., & Aiuti, A. (2026). *Circular design for Made in Italy furniture: A digital tool for data and materials exchange*. *Sustainability*, 18, 1061. <https://doi.org/10.3390/su18021061>

- Liu, X., & Zhu, Q. (2026). Sustainable furniture design: Harnessing the potential of information technology. *Sustainable Development*, 1–18. <https://doi.org/10.1002/sd.71069>
- Manrique López, A., & Herrera Jaramillo, J. A. (2023). Tarjetas de estrategias circulares como herramienta de ideación en el diseño circular. *La Tadeo DeArte*, 9(12), 1–21. <https://doi.org/10.21789/24223158.2025> (verificar DOI)
- Manzini, E. (2015). *Design, When Everybody Designs: An Introduction to Design for Social Innovation*. MIT Press.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Palos-Cerda, G. C., Martínez-Aguilar, G. M., & Morales-Rivas, J. G. (2025). Transitioning to circular economy in the furniture industry: Ethnographic insights from Mexican SMEs. *Journal-International Economy*, 9(15), 1–12. <https://doi.org/10.35429/JIEC.2025.9.15.2.1.12>
- Pascuaza Rivera, A., & López, W. R. (2013). *Aprovechamiento de los retales de madera como materia prima para la elaboración de productos de diseño industrial [Tesis de licenciatura, Universidad de Nariño]*.
- Rosas Burgos, V. K., Magaña Guzmán, T., & Becerril Mendoza, V. (2026). Diseño industrial y la integración curricular de los ODS. En S. E. Cruz Sotelo, S. Ojeda Benítez, & J. Tapia Fuentes (Coords.), *Caminando hacia la sustentabilidad: Buenas prácticas ambientales en la Universidad Autónoma de Baja California* (pp. 109–122). Universidad Autónoma de Baja California.
- Sydor, M., & Stańczyk, K. (2025). Analyzing joinery for furniture designed for disassembly. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9, 162. <https://doi.org/10.3390/jmmp9050162>
- Yuan, C., Cao, N., & Shi, Y. (2025). Complex surface fabrication via developable surface approximation: A survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(10), 9284–9302. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2025.3538782>
- Zhang, H., & Zhu, J. (2026). Advancing wooden furniture manufacturing through intelligent manufacturing: The past, recent research activities and future

perspectives. Wood Material Science & Engineering, 21(1), 717–738.

<https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2448020>

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.



 : <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i4.318>

Cómo citar este artículo (APA 7ª edición):

Becerril Mendoza, V. (2026). Diseño Circular y Manufactura Digital para el Desarrollo de Mobiliario Modular: Sistema Ensamblado sin Herramientas Mediante Paneles Entrelazados. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, 5(4), 1-25. <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i4.318>