



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN



Título del proyecto de investigación:

Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico para la producción de piezas CNC en la fabricación de prototipos WikiHouse

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN PERÍODO 2021-2025

CÓDIGO DE ÁREA	1	ÁREA DE CONOCIMIENTO:	Arquitectura
CÓDIGO DE LÍNEA	4	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:	Área de tecnología

NOMBRE DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN	SOHACO
CÓDIGO DEL GRUPO	VRI-GRU-24-2024-01-06-ESENARRO VARGAS

EQUIPO QUE HA DESARROLLADO EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN			
Responsabilidad	Grado académico, Nombres y Apellidos	ORCID	Correo electrónico
Investigador/a principal	Doctor , Esenarro Vargas, Doris	0000-0002-7186-9614	doris.esenarro@urp.edu.pe
Coinvestigador/a	Doctor ,Cobeñas Nizama, Pablo	0000-0002-2674-4732	pablo.cobenas@urp.edu.pe
Coinvestigador/a			
Coinvestigador/a			
Coinvestigador/a			
Investigador/a invitado/a	Doctor , Torricho Irahola, Ramiro Alfredo	0000-0001-9985-9533	Ramirotorrico13@hotmail.com
Investigador/a invitado/a			
Estudiante colaborador/a de pregrado			
Estudiante colaborador/a de pregrado	Pinedo Garcia, Fatima Liliana	0009-0004-2848-4761	202110083@urp.edu.pe
Egresado/a colaborador/a			

Bachiller colaborador/a	Vilchez Cairo, Jesica	0009-0007-2118- 5074	jesica.vilchez@urp.edu.pe
----------------------------	-----------------------	-------------------------	---------------------------

1.0. Título del proyecto:

Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico para la producción de piezas CNC en la fabricación de prototipos WikiHouse

2.0. Autor/es del proyecto:

Responsable: Esenarro, Doris¹

Colaborador(es): Cobeñas, Pablo²; Torricho, Ramiro³; Pinedo, Fátima⁴; Vilchez, Jesica⁵.

3.0. Resumen

Nota: El propósito del contenido del presente documento es contrastar el Informe Final del proyecto de investigación, con lo presentado en el proyecto aprobado por el Acuerdo del Consejo Universitario N°0554-2025, o con las modificaciones oportunamente aprobadas mediante Acuerdo del Consejo Universitario con posterioridad.

La investigación aborda las ineficiencias del sector de la edificación, caracterizadas por el alto desperdicio de material, los extensos tiempos de ejecución y la limitada adopción de tecnologías digitales, proponiendo como objetivo principal el desarrollo y validación de herramientas digitales paramétricas para optimizar el diseño arquitectónico y la fabricación CNC de prototipos WikiHouse, un sistema modular de código abierto basado en ensamblajes precisos sin uniones metálicas. La metodología se sustenta en la implementación de flujos de trabajo parametrizados CAD-CAM mediante el uso de Grasshopper y programación en Python, orientados a automatizar el diseño, mejorar la precisión geométrica y estandarizar la preparación de archivos para fabricación digital. Los resultados evidencian una mejora significativa en la eficiencia del proceso, logrando reducciones drásticas en los tiempos de procesamiento, que pasan de rangos entre 63 y 109 minutos en métodos manuales a aproximadamente 1 minuto ($\approx 0:32-1:16$) con flujos de trabajo parametrizados, además de una notable disminución del desperdicio de material y de la variabilidad entre operadores. Como conclusión, el estudio demuestra que la parametrización constituye una alternativa viable y accesible frente a la robotización, facilitando la transferencia y adaptación de sistemas constructivos abiertos como WikiHouse a contextos de baja tecnología, al optimizar recursos, reducir tiempos de preparación y fortalecer la eficiencia y reproducibilidad del proceso constructivo.

Abstract:

The research addresses inefficiencies in the building sector, characterized by high material waste, extended execution times, and limited adoption of digital technologies. Its main objective is the development and validation of parametric digital tools to optimize architectural design and CNC fabrication of WikiHouse prototypes, an open-source modular system based on precise assemblies without metal fasteners. The methodology is based on the implementation of parametric CAD-CAM workflows using Grasshopper and Python programming, aimed at automating design processes, improving geometric accuracy, and

¹ Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad Ricardo Palma

² Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad Ricardo Palma

³ Unidad de Investigación- Universidad Tecnológica Privada de Santa Cruz

⁴ Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad Ricardo Palma

⁵ Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad Ricardo Palma

standardizing file preparation for digital fabrication. The results demonstrate a significant improvement in process efficiency, achieving drastic reductions in processing times—from ranges between 63 and 109 minutes using manual methods to approximately 1 minute ($\approx 0:32-1:16$) with parametric workflows—along with a notable decrease in material waste and operator-dependent variability. In conclusion, the study demonstrates that parametrization is a viable and accessible alternative to robotization, facilitating the transfer and adaptation of open construction systems such as WikiHouse to low-technology contexts by optimizing resources, reducing preparation times, and strengthening the efficiency and reproducibility of the construction process.

Palabras clave: *herramientas digitales; optimización; WikiHouse; paramétrico; prefabricación.*

Keyword: *digital tools; optimization; Wiki House; parametric; prefabrication.*

4.0. Introducción

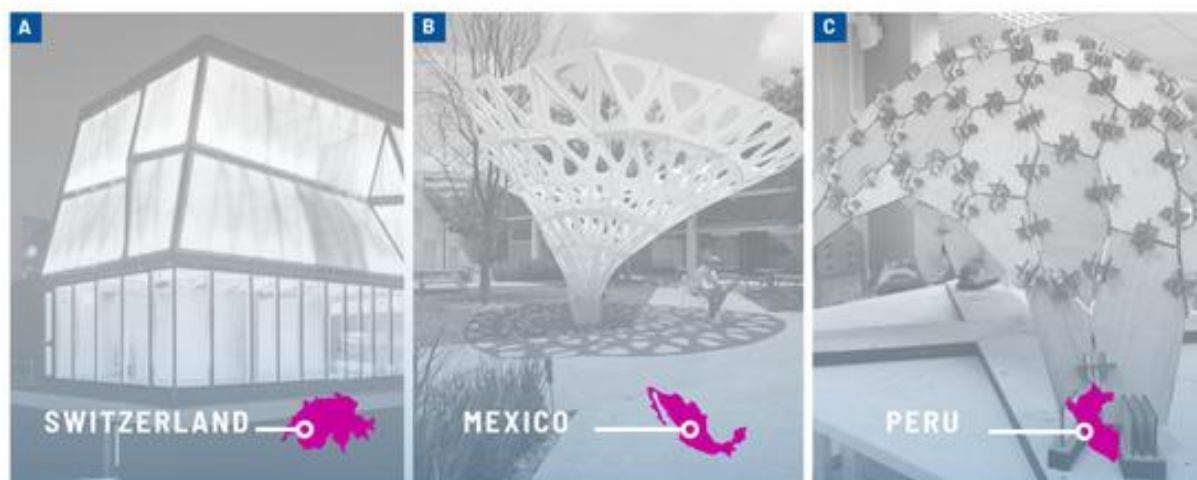
El uso de tecnologías en el proceso de diseño arquitectónico siempre ha sido crucial para definir la eficiencia y calidad de las construcciones. Sin embargo, en la actualidad, la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción enfrenta múltiples desafíos en los métodos de construcción convencionales, uno de los principales problemas es el prolongado tiempo de ejecución (Yudhistira et al., 2024), ya que estos sistemas requieren numerosas etapas secuenciales como encofrado, curado del concreto, ensamblaje estructural y acabado manual (Shufrin et al., 2023) que extienden los cronogramas y causan retrasos. Esta situación se agrava por la alta dependencia de mano de obra especializada (Karimi et al., 2018), especialmente para tareas como la instalación de estructuras metálicas o el manejo de sistemas húmedos, lo que aumenta los costos del proyecto y lo hace vulnerable a la escasez de trabajadores calificados.

A esto se suma el alto nivel de desperdicio en las obras de construcción, causado por errores de cálculo, mala planificación logística o excesivo acaparamiento de material. En proyectos tradicionales, entre un 10% y un 30% de los materiales adquiridos se desperdician, generando no solo importantes sobrecostos sino también un uso ineficiente de los recursos (Formoso et al., 2002). Por otro lado, la industria de la construcción convencional enfrenta una creciente presión debido a su impacto ambiental, (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2023) ya que es responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones globales de dióxido de carbono (37%) (Peteck et al., 2016). En particular, la producción de cemento fundamental en la fabricación de concreto contribuye con cerca del 8% de las emisiones globales de CO₂, debido a los procesos de calcinación del clínker y al alto consumo energético involucrado en su producción (Le Quere et al., 2016).

En este sentido, el uso de herramientas digitales paramétricas en la construcción surge como una alternativa prometedora a los desafíos estructurales del método tradicional, como el alto desperdicio de material, los elevados costos operativos y la dependencia de mano de obra especializada. A nivel internacional, como se muestra en la Figura 1A, DFAB House es un proyecto pionero desarrollado por ETH Zürich en colaboración con NCCR Digital Fabrication. Este edificio fue diseñado y construido utilizando métodos avanzados de fabricación digital, incluyendo impresión 3D de hormigón, robótica y diseño computacional. El proyecto integra tecnologías como In situ Fabricator, Mesh Mould y Smart Slab, demostrando el potencial de la digitalización en la arquitectura y la construcción. DFAB House ha sido ampliamente documentado en diversas fuentes académicas y profesionales (Pintos et al., 2020).

Figura 1

DFAB ET, Suiza; (B) Pabellón paramétrico DIGFABMTY2.0; (C) Prototipo de madera LADDFAB, Perú.



Nota. Elaboración propia.

En Latinoamérica, un caso notable es el Pabellón Paramétrico DIGFABMTY2.0, un proyecto experimental desarrollado por estudiantes de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño del Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey. Este pabellón (véase la Figura 1B) fue diseñado utilizando herramientas de diseño paramétrico como Rhinoceros y Grasshopper, y construido con materiales como Coroplast. El proyecto consistió en una estructura temporal derivada de la exploración de formas piramidales y se llevó a cabo como parte del curso de Tecnología Arquitectónica Avanzada. El proceso incluyó el desarrollo de algoritmos, prototipos a diferentes escalas y la fabricación y ensamblaje de 304 piezas que conforman el sistema paramétrico (Graser et al.,2021)

5.0. Planteamiento del problema

En el contexto peruano, el laboratorio LADDFAB (ver Figura 1 C) de la Universidad Ricardo Palma (Perú) desarrolló un prototipo de estructura de contrachapado laminado mediante diseño computacional y corte CNC de dos ejes. El proyecto propone una alternativa eficiente y de bajo costo para zonas con acceso limitado a tecnologías avanzadas mediante el uso de placas hexagonales segmentadas y uniones mecánicas de madera de “media traslape”, ensambladas sin tornillos ni adhesivos. El modelo, compuesto por 63 paneles y 163 conectores, soportó una carga puntual de 0,8 kN con una deformación máxima de solo 5 mm y fue ensamblado por dos personas en menos de seis horas. Este trabajo no solo demuestra la viabilidad técnica y estructural del sistema, sino que también propone un camino viable para democratizar la construcción digital en contextos emergentes, con un claro enfoque ecológico y pedagógico. (Esenarro et al.,2024)

Estas referencias demuestran que la integración de herramientas digitales paramétricas en el proceso de diseño arquitectónico no solo aumenta la precisión, la eficiencia y la sostenibilidad de los proyectos de construcción, sino que también contribuye a la democratización de tecnologías avanzadas, incluso en contextos con recursos limitados. Sin embargo, a pesar de sus contribuciones, estos casos presentan lagunas que abren nuevas líneas de investigación.

La Casa DFAB exhibe un alto nivel tecnológico, pero su complejidad y costo dificultan su replicación en contextos emergentes. DIGFABMTY2.0, a pesar de su valor pedagógico y exploratorio, se centró principalmente en la experimentación formal y en demostrar el

potencial estético del diseño paramétrico, sin abordar procesos de optimización orientados a la reducción de material ni a la eficiencia estructural. Por su parte, LADDFAB representa un avance significativo en el contexto peruano al incorporar corte CNC y ensamblajes mecánicos, aunque su alcance se limita a la escala experimental y no desarrolla estrategias para reducir desperdicios ni acelerar la producción en serie de componentes.

En este marco, el objetivo de la presente investigación es minimizar esta brecha mediante el desarrollo de experimentos comparativos aplicados al proceso de construcción del sistema WikiHouse. Los grupos de estudio emplearon dos enfoques: una solución paramétrica digital (Grasshopper + Python) y un método de modelado convencional (Rhinoceros + SketchUp). Los experimentos buscan evaluar y contrastar el tiempo de procesamiento, la precisión geométrica, la trazabilidad y el desperdicio de material, determinando el impacto de la automatización algorítmica en la eficiencia del proceso. Asimismo, se aplicó una encuesta de satisfacción a los grupos participantes para medir la percepción de usabilidad, velocidad y efectividad entre ambas metodologías.

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

- ¿Cuál es la relación entre el uso de herramientas digitales paramétricas (Grasshopper y Python) y la optimización del proceso de diseño arquitectónico en la producción de piezas CNC para la fabricación de prototipos WikiHouse?

Asimismo, se plantean los siguientes problemas específicos:

- ¿Cuál es la relación entre el uso de herramientas digitales paramétricas y la precisión y eficiencia en el diseño de piezas CNC?
- ¿En qué medida el uso de herramientas digitales en el diseño arquitectónico se relaciona con la reducción del desperdicio de material durante la fabricación de piezas CNC?
- ¿Cómo se relaciona la generación de algoritmos mediante Grasshopper con la reducción del tiempo requerido en la fabricación de piezas CNC destinadas a la construcción de prototipos WikiHouse?

□ ¿Cuál es la relación entre la precisión y eficiencia del diseño arquitectónico y la facilidad de ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse?

6.0. Objetivos

6.1. Objetivo General

- Analizar la relación entre el uso de herramientas digitales paramétricas (Grasshopper y Python) y la optimización del proceso de diseño arquitectónico en la producción de piezas CNC para la fabricación de prototipos WikiHouse.

6.2. Objetivos específicos

- Evaluar la relación entre el uso de herramientas digitales paramétricas y la mejora en la precisión y eficiencia del diseño de piezas CNC.
- Analizar en qué medida el uso de herramientas digitales se relaciona con la optimización del proceso de diseño arquitectónico en la reducción del desperdicio de material durante la fabricación de piezas CNC.
- Explorar la relación entre la generación de algoritmos mediante Grasshopper y la reducción del tiempo en la fabricación de piezas CNC destinadas a la construcción de prototipos WikiHouse.
- Determinar la relación entre la precisión y eficiencia del diseño arquitectónico y la facilidad de ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse.

7.0. Justificación

El déficit habitacional en el Perú constituye un problema estructural, evidenciado en el alto porcentaje de viviendas que presentan condiciones inadecuadas e inseguras. Esta situación se ve agravada por la limitada incorporación de tecnologías innovadoras en el sector construcción, así como por una expansión urbana desordenada que dificulta el acceso a soluciones habitacionales eficientes y sostenibles.

En este contexto, la presente investigación propone optimizar el proceso de diseño arquitectónico y la producción de piezas CNC para el sistema WikiHouse mediante el uso de herramientas digitales paramétricas como Grasshopper y Python, integrando además tecnologías BIM y procesos de fabricación digital. Este enfoque permite mejorar la precisión geométrica, reducir el desperdicio de material y disminuir los tiempos de producción, contribuyendo al desarrollo de soluciones constructivas más eficientes, accesibles y replicables.

Asimismo, la investigación adquiere relevancia desde una perspectiva metodológica, ya que emplea un enfoque mixto y un diseño cuasi-experimental que permite evaluar de manera comparativa el impacto del uso de herramientas digitales frente a métodos tradicionales. A través de la integración de mediciones cuantitativas —como tiempo, precisión y desperdicio— y valoraciones cualitativas de los usuarios, se logra una comprensión integral del proceso, fortaleciendo la validez y aplicabilidad de los resultados.

En este sentido, la metodología adoptada no solo permite analizar la relación entre variables, sino también demostrar empíricamente los beneficios del diseño paramétrico en contextos reales de fabricación digital. Finalmente, la propuesta se alinea con las políticas nacionales de vivienda y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9 (industria, innovación e infraestructura) y 11 (ciudades y comunidades sostenibles), contribuyendo al desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la calidad de vida de la población.

8.0. Antecedentes

Porras et al. (2024) La investigación titulada “Toward Cost-Effective Timber Shell Structures through the Integration of Computational Design, Digital Fabrication, and Mechanical Integral ‘Half-Lap’ Joints” tiene como objetivo desarrollar y validar estructuras de madera eficientes en términos de costo mediante la integración del diseño computacional, la fabricación digital y uniones mecánicas integrales tipo half-lap, abordando como problemática la necesidad de optimizar la integridad estructural, el desempeño de los conectores, los tiempos de ensamblaje y desmontaje, así como la reducción del desperdicio de material y los costos asociados a la construcción y gestión de residuos. La metodología se basó en el desarrollo y evaluación de un prototipo estructural segmentado fabricado con máquinas CNC de dos ejes y corte láser industrial, analizando su comportamiento mecánico, la eficiencia del sistema de ensamblaje y la distribución de los conectores. Los resultados demostraron que la estructura cumple con la normativa E.010 para estructuras de madera, soportando una carga de 0.8 kN con un desplazamiento máximo de 5 mm, además de evidenciar que una adecuada optimización de conectores mejora la transferencia de carga y la estabilidad del sistema, y que el tiempo de montaje se redujo de 8 a 5 horas, favoreciendo su aplicación en sistemas modulares reutilizables. En conclusión, el estudio aporta un enfoque innovador y sostenible para la construcción en madera, al integrar tecnologías digitales que optimizan los procesos constructivos, minimizan el desperdicio de material y permiten la escalabilidad del sistema, constituyendo una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en estructuras eficientes, resistentes y ambientalmente responsables.

Esenarro et al. (2024) La investigación titulada “Use of Digital Tools (WikiHouse System) in Multi-Local Social Housing” tiene como objetivo evaluar el uso del sistema WikiHouse y de herramientas digitales como una alternativa innovadora para la vivienda social modular, abordando la problemática de las limitaciones de los sistemas prefabricados tradicionales, como el PVC, en términos de flexibilidad, sostenibilidad y adaptación a distintos contextos. La

metodología se basa en la aplicación de diseño paramétrico mediante herramientas digitales como Grasshopper, la fabricación digital mediante corte CNC y el análisis del desempeño del sistema WikiHouse bajo principios de economía circular, eficiencia energética y estrategias bioclimáticas. Los resultados evidencian una alta flexibilidad y adaptabilidad del diseño modular, permitiendo modificaciones eficientes en la disposición de elementos arquitectónicos, una reducción del desperdicio de material, una menor huella de carbono gracias al uso de la madera como material principal y una mejora del confort térmico mediante estrategias como la ventilación cruzada. En conclusión, el estudio consolida al sistema WikiHouse como una alternativa viable, accesible y sostenible para la vivienda social, destacando el potencial del modelo de “diseño global, fabricación local” (DGML) para reducir costos, descentralizar la producción y fortalecer la autonomía de las comunidades en contextos urbanos y rurales.

Romero et al. (2024) La investigación titulada “Evaluación de un sistema constructivo modular elaborado con materiales de bajo impacto ambiental para el logro de proyectos de vivienda sustentables” tiene como objetivo analizar los impactos ambientales y económicos de este sistema, basado en el modelo Skylark 250 con estructura de contrachapado, aislamiento térmico de paja de trigo aplicada por soplado y acabado interior de yeso de arcilla. El estudio aborda la crisis de la vivienda y el cambio climático en la industria de la construcción, proponiendo un sistema modular industrializado que utilice materiales de bajo impacto ambiental para mejorar la eficiencia, reducir costos y tiempos de construcción. La metodología incluyó la evaluación de la transmitancia térmica, demanda energética, impacto ambiental y análisis económico. Los resultados indicaron una demanda energética de 55 kWh/m²-año, cumpliendo con el reto de cero emisiones netas al integrar paneles fotovoltaicos, además de una reducción del 44% en el tiempo de construcción y un 29% en los costos, demostrando que el sistema propuesto es una alternativa atractiva y viable económicamente para el mercado inmobiliario, al ser más eficiente, sostenible y rentable que los métodos tradicionales.

Priavolou et al. (2024) La investigación titulada “Assessing the Openness and Conviviality of Open Source Technology: The Case of the WikiHouse.” Tuvo como objetivo analizar el grado de apertura y convivialidad de las tecnologías de construcción de código abierto, específicamente el sistema WikiHouse, y su potencial para contribuir a soluciones habitacionales más sostenibles, accesibles y participativas frente a la crisis de la vivienda. La investigación se desarrolló mediante un estudio de caso del proyecto WikiHouse Den Bosch, utilizando métodos cualitativos como entrevistas, observación participativa y análisis documental, apoyados en herramientas analíticas como la matriz de tecnología convivial y el open-O-meter, que permitieron evaluar la accesibilidad, adaptabilidad, participación comunitaria y transparencia del sistema constructivo. Los resultados evidenciaron que WikiHouse promueve la modularidad, la colaboración y el intercambio de conocimiento, favoreciendo la sostenibilidad social y ambiental; sin embargo, se identificaron limitaciones en la apertura total de la documentación técnica y en la posibilidad de modificar libremente los diseños, lo que restringe su replicabilidad plena. Se concluye que la apertura y la convivialidad en las tecnologías de construcción son condiciones graduales y mejorables, y que el fortalecimiento del acceso a la información técnica y la participación activa de los usuarios puede potenciar sistemas como WikiHouse como alternativas viables y sostenibles para la edificación contemporánea.

9.0. Marco teórico y conceptual

9.1. Marco Teórico

9.1.1 Herramientas digitales

Las herramientas digitales en arquitectura comprenden el conjunto de softwares y plataformas computacionales que apoyan las fases de diseño, análisis, representación y construcción del proyecto arquitectónico. Su incorporación ha permitido una mayor precisión técnica, integración de información y capacidad de simulación, transformando la práctica arquitectónica tradicional hacia procesos más complejos, colaborativos y basados en datos. Eastman et al. (2011) señalan que las herramientas digitales facilitan la gestión integral del proyecto arquitectónico mediante modelos informativos que integran geometría, datos técnicos y desempeño.

Oxman (2006) destaca que estas herramientas no solo representan la forma, sino que influyen directamente en la generación del diseño. Estas herramientas digitales no se limitan a la representación gráfica o visualización de la forma arquitectónica, sino que intervienen activamente en la generación del diseño, ya que condicionan la manera en que el arquitecto concibe, desarrolla y evalúa las soluciones espaciales. A través de procesos computacionales, las herramientas digitales permiten definir reglas, parámetros y relaciones lógicas que guían la configuración formal desde las etapas iniciales del proyecto, influyendo en decisiones compositivas, funcionales, ambientales y constructivas. De este modo, el diseño deja de ser un resultado estático para convertirse en un sistema dinámico, capaz de adaptarse a múltiples variables y escenarios, lo que transforma al software en un agente activo del proceso creativo y no solo en un medio de representación.

La digitalización redefine la relación entre concepción formal y producción constructiva. Desde una perspectiva analítica, las herramientas digitales constituyen la base tecnológica que posibilita el desarrollo del diseño paramétrico y la fabricación digital. Su uso permite reducir errores, mejorar la coordinación interdisciplinaria y optimizar recursos, convirtiéndose en un elemento clave para la eficiencia y sostenibilidad en la arquitectura contemporánea.

El planteamiento evidencia que las herramientas digitales introducen un cambio estructural en el proceso de diseño arquitectónico, al pasar de un enfoque centrado en la representación final de la forma a uno basado en la generación informada y controlada del diseño. Al permitir la definición de reglas, parámetros y relaciones lógicas desde las etapas iniciales, estas herramientas influyen directamente en la toma de decisiones proyectuales, integrando simultáneamente aspectos compositivos, funcionales, ambientales y constructivos. Esto implica que el arquitecto deja de operar únicamente como modelador de formas para asumir un rol de gestor de sistemas de diseño, capaz de evaluar múltiples alternativas de manera simultánea.

Desde una perspectiva analítica más amplia, la digitalización redefine la relación tradicional entre concepción formal y producción constructiva al establecer una continuidad entre diseño, análisis y fabricación. Las herramientas digitales se convierten en la infraestructura tecnológica que hace posible el diseño paramétrico y la fabricación digital, reduciendo la brecha entre lo conceptual y lo material. En este sentido, su implementación contribuye a minimizar errores, optimizar el uso de recursos y mejorar la coordinación interdisciplinaria, factores que inciden directamente en la eficiencia del proceso proyectual y en la sostenibilidad de la arquitectura contemporánea.

9.1.2 Herramientas paramétricas

Las herramientas paramétricas son sistemas de diseño que operan mediante parámetros y relaciones variables, permitiendo modificar un modelo arquitectónico de manera dinámica sin reconstruirlo desde cero. Estas herramientas favorecen procesos iterativos y adaptativos, facilitando la exploración formal y funcional de múltiples alternativas de diseño. Schumacher (2009) identifica este enfoque como el fundamento del parametricismo, las herramientas paramétricas permiten un mayor control del

diseño arquitectónico frente a variables complejas como clima, materialidad y eficiencia constructiva. Su aplicación resulta fundamental en procesos de optimización, simulación y fabricación digital, especialmente cuando se integran con algoritmos y tecnologías CNC.

9.1.3 Eficiencia

La eficiencia en arquitectura se entiende como la capacidad de optimizar el uso de recursos materiales, energéticos, temporales y espaciales a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, desde la concepción del diseño hasta su ejecución y operación. Este enfoque busca maximizar el desempeño funcional, ambiental y constructivo del proyecto con el menor impacto posible sobre el entorno, respondiendo a las crecientes demandas de sostenibilidad, racionalización constructiva y responsabilidad ambiental en la arquitectura contemporánea. En este sentido, la eficiencia deja de ser un criterio exclusivamente técnico para convertirse en un principio integral del diseño.

Alexander (1979) sostiene que la eficiencia arquitectónica se alcanza cuando la forma construida responde de manera coherente y precisa a las necesidades humanas y contextuales, evitando soluciones innecesarias o sobrecargadas. Complementariamente, Kibert (2016) plantea que la eficiencia es un eje fundamental de la construcción sostenible, al estar directamente relacionada con la reducción del consumo de recursos, la minimización de residuos y la mejora del rendimiento a largo plazo del entorno construido.

Desde un análisis arquitectónico contemporáneo, la eficiencia no se limita a la reducción del consumo energético o material, sino que abarca también la optimización del proceso de diseño y construcción. La incorporación de herramientas digitales, sistemas paramétricos y tecnologías de fabricación CNC permite anticipar decisiones, simular escenarios, reducir errores de ejecución y minimizar desperdicios, generando procesos más precisos y controlados. De este modo, la eficiencia se consolida como un resultado directo de la integración entre diseño computacional, planificación constructiva y sostenibilidad, reforzando su rol estratégico en la arquitectura actual.

9.1.4 Algoritmos

Los algoritmos en arquitectura se definen como conjuntos estructurados de instrucciones lógicas y matemáticas que permiten generar, evaluar y optimizar soluciones de diseño de manera sistemática y automatizada. Su incorporación al proceso proyectual introduce una lógica computacional que transforma la manera tradicional de concebir la forma arquitectónica, desplazando el énfasis desde la intuición formal aislada hacia la definición de procesos, reglas y relaciones entre variables. En este contexto, el arquitecto deja de diseñar únicamente objetos finales para diseñar sistemas generativos capaces de producir múltiples alternativas a partir de un mismo conjunto de condiciones iniciales.

Terzidis (2006) sostiene que el diseño algorítmico no se centra en la creación directa de formas, sino en la formulación de reglas y procedimientos que gobiernan su generación, lo que amplía significativamente el campo de exploración formal. Burry (2011) destaca que los algoritmos han permitido abordar geometrías complejas y no convencionales que serían difíciles de desarrollar mediante métodos tradicionales de diseño.

Desde un análisis arquitectónico y tecnológico, los algoritmos permiten integrar simultáneamente múltiples variables geométricas, ambientales, estructurales y

constructivas dentro de un mismo proceso de diseño, favoreciendo soluciones optimizadas, coherentes y replicables. Esta capacidad resulta fundamental en el desarrollo de herramientas paramétricas, donde los algoritmos controlan las relaciones entre componentes, y en la preparación de modelos para la fabricación digital, ya que aseguran precisión, coherencia y control en la transición del diseño virtual a la producción material. En consecuencia, los algoritmos se consolidan como un componente esencial del diseño arquitectónico contemporáneo orientado a la eficiencia, la innovación y la sostenibilidad.

9.1.5 Producción de piezas CNC

La producción de piezas CNC se refiere al proceso de fabricación digital mediante máquinas controladas numéricamente que transforman modelos digitales en componentes físicos con alta precisión. Este sistema ha revolucionado la relación entre diseño arquitectónico y construcción.

Kolarevic (2003) destaca que la fabricación CNC permite una conexión directa entre diseño y producción. Desde el análisis arquitectónico, la producción CNC reduce errores, desperdicio y tiempos de ejecución, favoreciendo sistemas constructivos precisos y eficientes. Su integración con herramientas paramétricas potencia la coherencia entre diseño y ensamblaje.

La producción de piezas CNC (Control Numérico Computarizado) se refiere al proceso de fabricación digital mediante el cual máquinas automatizadas, controladas por instrucciones numéricas derivadas de modelos digitales, transforman información geométrica en componentes físicos con altos niveles de precisión, repetibilidad y control dimensional. Este sistema ha redefinido la relación tradicional entre el diseño arquitectónico y la construcción, al establecer una continuidad directa entre la concepción digital del proyecto y su materialización, reduciendo la dependencia de procesos manuales y artesanales.

Kolarevic (2003) señala que la fabricación CNC permite una conexión directa entre el diseño y la producción, eliminando intermediarios y minimizando discrepancias entre el modelo proyectado y el resultado construido. Gershenfeld (2005) destaca que estas tecnologías abren la posibilidad de la personalización masiva, permitiendo fabricar piezas únicas sin incrementar significativamente los costos de producción. Asimismo, Pottmann et al. (2015) enfatizan que la exactitud geométrica alcanzada mediante CNC resulta fundamental para la construcción de geometrías complejas y sistemas constructivos de alta precisión.

Desde un análisis arquitectónico y constructivo, la producción de piezas CNC contribuye significativamente a la reducción de errores, desperdicio de material y tiempos de ejecución, al basarse en procesos controlados y previamente simulados. Su integración con herramientas paramétricas y diseño algorítmico potencia la coherencia entre el modelo digital, la lógica de ensamblaje y la ejecución constructiva, favoreciendo sistemas edificatorios más eficientes, precisos y sostenibles. En este sentido, la fabricación CNC se consolida como un componente estratégico de la arquitectura contemporánea orientada a la innovación tecnológica y la optimización de recursos.

9.1.6 Desperdicio

El desperdicio en la construcción se define como toda pérdida de material, tiempo, energía o esfuerzo que no genera valor para el producto final ni para el usuario, manifestándose a lo largo de las distintas etapas del proceso constructivo, desde el diseño hasta la ejecución y el mantenimiento. Este fenómeno constituye uno de los principales problemas del sector de la construcción, debido a su impacto directo en los

costos, la productividad y el deterioro ambiental, razón por la cual su reducción se ha convertido en un objetivo prioritario en los enfoques contemporáneos de eficiencia, sostenibilidad y optimización de procesos.

Koskela (1992) introduce el concepto de desperdicio desde la filosofía de la lean construction, señalando que cualquier actividad que no aporte valor al proceso constructivo debe ser identificada y eliminada. Formoso et al. (2002) profundizan en este enfoque al analizar cómo el desperdicio afecta negativamente la productividad, generando retrasos, sobrecostos y baja calidad en la ejecución de las obras. Por su parte, Kibert (2016) vincula el desperdicio con el impacto ambiental del sector construcción, destacando que el uso ineficiente de materiales y energía incrementa la huella ecológica y compromete la sostenibilidad del entorno construido.

Desde un análisis arquitectónico y tecnológico, el uso de herramientas de diseño digital, sistemas paramétricos y procesos de fabricación CNC permite reducir significativamente el desperdicio al incorporar precisión, planificación anticipada y control detallado del material desde las etapas iniciales del proyecto. Estas tecnologías posibilitan la simulación previa de soluciones constructivas, la optimización de cortes y ensamblajes, y la minimización de errores en obra, contribuyendo a una arquitectura más eficiente, responsable y alineada con los principios de la sostenibilidad contemporánea.

9.1.7 Ensamblaje

El ensamblaje arquitectónico es el proceso mediante el cual los componentes constructivos de un proyecto, tales como paredes, techos, estructuras, acabados y otros elementos, son unidos y articulados para formar un sistema coherente y funcional que cumpla con los requisitos de uso, seguridad, estética y eficiencia. Este concepto se ha vuelto esencial en la prefabricación y en la fabricación digital, ya que permite una mayor controlabilidad de los procesos, precisión en los ensamblajes y reducción de los errores en obra, lo que a su vez contribuye a la optimización de tiempos y costos en la construcción.

Frampton (1995) aborda el ensamblaje desde la perspectiva de la tectónica arquitectónica, entendiendo que el ensamblaje no es simplemente un proceso técnico, sino una manifestación de la relación entre el material y la forma. En su análisis, la forma arquitectónica debe expresar la estructura interna y la lógica de ensamblaje de sus componentes, lo que implica que el diseño debe estar intrínsecamente relacionado con las técnicas constructivas y los materiales utilizados. Por otro lado, Kieran y Timberlake (2004) relacionan el ensamblaje con los procesos industrializados y prefabricados, sugiriendo que la arquitectura contemporánea se beneficia enormemente de los sistemas constructivos estandarizados y modulares, que permiten una mayor replicabilidad y eficiencia en la construcción. Picon (2010) añade una dimensión más contemporánea a este concepto, analizando cómo el ensamblaje ha evolucionado en la era digital, integrando tecnologías de fabricación computarizada y modelado paramétrico para lograr una precisión y eficiencia sin precedentes.

“Ensamblaje no solo implica la unión de partes, sino una visión compleja de cómo la técnica y el diseño se encuentran para producir una arquitectura coherente y eficiente.”(Frampton, 1995, p. 45)

Desde una perspectiva analítica, la digitalización del ensamblaje ha transformado profundamente las prácticas constructivas, permitiendo que los sistemas de ensamblaje sean más precisos, replicables y eficientes. La integración de piezas CNC con diseño paramétrico permite la fabricación de componentes arquitectónicos que se ensamblan con una precisión casi exacta, lo que reduce considerablemente el margen de error en obra y mejora la calidad global del proyecto. Este tipo de ensamblaje

digitalizado no solo optimiza el uso de los recursos materiales, sino que también favorece la sostenibilidad, ya que permite reducir los desperdicios y la necesidad de trabajo manual intensivo. Además, la capacidad de producir componentes modulares y preconfigurados en fábrica facilita la modularidad y la flexibilidad en la construcción, elementos clave en la arquitectura contemporánea que busca adaptabilidad y eficiencia.

En resumen, el ensamblaje arquitectónico no es simplemente un proceso de ensamblar componentes, sino un aspecto fundamental del diseño y la construcción que, al integrar nuevas tecnologías de fabricación y diseño, permite crear soluciones arquitectónicas más eficientes, sostenibles y de alta calidad. El ensamblaje digitalizado, mediante la integración de CNC y parametricismo, promueve una mayor integración entre el diseño y la fabricación, convirtiéndose en un factor esencial para la innovación y la optimización de procesos en la construcción moderna.

10.0. Hipótesis

10.1. Hipótesis General

- Existe una relación significativa entre el uso de herramientas digitales paramétricas (Grasshopper y Python) y la optimización del proceso de diseño arquitectónico en la producción de piezas CNC para la fabricación de prototipos WikiHouse.

10.2. Hipótesis específicas

- El uso de herramientas digitales paramétricas se relaciona positivamente con la mejora en la precisión y eficiencia del diseño de piezas CNC.
- El uso de herramientas digitales en el diseño arquitectónico se asocia con una reducción en el desperdicio de material durante la fabricación de piezas CNC.
- La generación de algoritmos mediante Grasshopper se relaciona con una disminución en el tiempo requerido para la fabricación de piezas CNC destinadas a la construcción de prototipos WikiHouse.
- Existe una relación entre la precisión y eficiencia del diseño arquitectónico y la facilidad de ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse.

11.0. Variables

11.1. Variable Independiente: Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico

Tabla 1.

Matriz de Operacionalización de variable independiente.

Variable Independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico	Se refiere a la aplicación de sistemas computacionales basados en parámetros, algoritmos y lógica de programación para generar,	El uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python se operacionaliza a partir del nivel de	Precisión y eficiencia en el diseño	Capacidad de automatización de modificaciones en el diseño (número de parámetros ajustables) Cantidad de iteraciones necesarias para alcanzar un diseño

modificar y optimizar soluciones arquitectónicas de manera dinámica	implementación del modelado paramétrico y algorítmico en el proyecto arquitectónico, evaluado mediante indicadores como la cantidad y complejidad de parámetros utilizados.	Generación de algoritmos	óptimo (número de versiones)	Tiempo de ejecución del algoritmo (segundos/minutos)
---	---	--------------------------	------------------------------	--

Nota. Elaboración propia.

11.2. Variable Independiente: Producción de piezas CNC

Tabla 2.

Matriz de Operacionalización de variable Dependiente.

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Producción de piezas CNC	La producción de piezas CNC se refiere al proceso de fabricación digital mediante el uso de máquinas de control numérico computarizado, en el cual los componentes arquitectónicos o constructivos son elaborados a partir de modelos digitales precisos.	La producción de piezas CNC se operacionaliza a través del grado de implementación de procesos de fabricación digital en un proyecto, evaluado mediante indicadores como la generación de archivos compatibles (G-code), la precisión dimensional de las piezas producidas, el nivel de aprovechamiento del material, la reducción de errores de fabricación, y la correcta correspondencia entre el modelo digital y las piezas	Reducción del desperdicio de material	Cantidad de desperdicio generado (kg) Relación material utilizado vs. material disponible (%)
			Ensamblaje y construcción	Necesidad de procesos post-mecanizado (lijado, ensamblaje adicional)

físicas obtenidas
mediante
maquinaria CNC.

Nota. Elaboración propia.

12.0. Método

12.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es cuasi-experimental, ya que se comparan grupos de estudio bajo condiciones diferenciadas con el fin de evaluar el impacto del uso de herramientas digitales paramétricas en el proceso de diseño y fabricación de piezas CNC. En este caso, se estableció un grupo experimental que utilizó herramientas paramétricas (Grasshopper y Python) y grupos de control que emplearon métodos tradicionales (Rhino y SketchUp).

Si bien no se realizó una asignación aleatoria de los participantes, se aplicaron procedimientos distintos a cada grupo, lo que permitió analizar variaciones en variables como el tiempo de ejecución, la precisión geométrica y el desperdicio de material. Este enfoque permite evaluar el efecto de la automatización algorítmica en un entorno aplicado, manteniendo un control parcial de las condiciones de estudio.

12.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada (Castro, Gómez y Camargo, 2023), ya que busca generar soluciones prácticas para mejorar la eficiencia en la fabricación de prototipos y construcción a escala real.

12.1.2. Método de investigación

La investigación adopta un enfoque mixto (Mulisa, 2021; Ruiz et al., 2013), combinando técnicas cuantitativas y cualitativas para el análisis integral del fenómeno de estudio. Desde el enfoque cuantitativo, se evalúan variables como el tiempo de ejecución, la precisión y el desperdicio de material en los distintos grupos experimentales y de control. Desde el enfoque cualitativo, se analizan las percepciones de los participantes mediante encuestas, considerando aspectos como usabilidad, accesibilidad y eficiencia percibida.

El estudio se desarrolla en un nivel correlacional-explicativo, ya que no solo busca identificar la relación entre el uso de herramientas digitales paramétricas y la optimización del proceso de diseño arquitectónico, sino también analizar el efecto de su aplicación en contextos reales de fabricación digital.

12.2. Muestra / Participantes / Sujetos / Base de datos

La población estuvo compuesta por estudiantes de pregrado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Ricardo Palma. La muestra estuvo compuesta por 12 estudiantes seleccionados según el criterio de conocimientos previos de Rhino 8, Grasshopper y SketchUp 2024. Este grupo fue seleccionado porque los participantes cursaban séptimo y octavo semestre del programa de estudios, niveles en los que ya habían adquirido competencias digitales avanzadas a través de cursos como Presentación Digital y Diseño Arquitectónico Integral. Esta formación les permitió participar activamente en el curso electivo, aplicando procesos digitales orientados a la automatización y optimización de la prefabricación, integrando conceptos de Grasshopper y Python en el desarrollo de propuestas arquitectónicas más eficientes.

12.3. Instrumentos de recolección de datos

El instrumento principal de esta investigación fue la encuesta, que se aplicó a los participantes con el objetivo de obtener información directa sobre sus percepciones, conocimientos y experiencias relacionadas con el tema investigado. La encuesta permitió recoger una amplia gama de datos, lo que facilitó el análisis y la interpretación de los resultados, permitiendo identificar patrones, tendencias y relaciones significativas en la muestra seleccionada. Además, su uso fue fundamental para evaluar la respuesta de los sujetos a diferentes variables del estudio en un contexto real.

12.4. Técnicas de procesamiento de datos

La técnica utilizada en esta investigación fue el cuestionario, que permitió estructurar y organizar las preguntas de manera precisa y directa para recopilar datos relevantes. Este instrumento facilitó la recolección de información tanto cuantitativa como cualitativa, ayudando a medir variables clave relacionadas con el objetivo del estudio. El cuestionario fue diseñado con un enfoque claro y consistente para asegurar la validez de los datos obtenidos y para obtener respuestas comparables y consistentes.

13.0. Resultados

Los hallazgos se presentan a partir de cuatro experimentos sucesivos, cada uno de los cuales busca evaluar el impacto del uso de herramientas digitales paramétricas (Grasshopper y Python) en diferentes fases del flujo de trabajo de WikiHouse. Los resultados de cada experimento se estructuran en torno a dos ejes: la experiencia con las herramientas digitales y el rendimiento operativo del proceso de prefabricación.

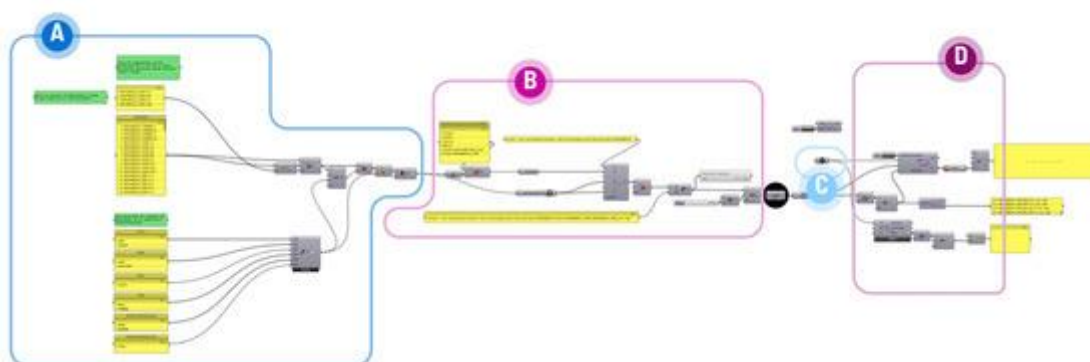
13.1. Resultado del experimento 1: Descarga de piezas

Este primer experimento se centró en la fase inicial del flujo de trabajo de WikiHouse: la obtención de los archivos que definen cada componente del edificio. Se comparó la descarga manual de piezas con la descarga asistida por un script paramétrico (véase la Figura 2) que automatiza la descarga de piezas modulares desde una base de datos en línea. Los componentes de Grasshopper generan los nombres de las piezas y las clasifican en categorías (A). A continuación, se añade la dirección web (URL) correspondiente para localizar la pieza exacta que se va a descargar, además de especificar la cantidad necesaria (B). El componente "C:/" define la ubicación donde se guardarán los archivos descargados, normalmente en una carpeta del escritorio del usuario (C). Finalmente, los componentes de verificación verifican que la descarga se haya completado correctamente (D).

Figura 2

Script paramétrico para automatizar la descarga y organización de piezas de WikiHouse.

ALGORITHM 1



Nota. Elaboración propia.

El principal parámetro cuantitativo evaluado en esta etapa fue el tiempo necesario para completar la descarga y organización de las piezas (véase la Tabla 3). El grupo de control realizó el procedimiento manualmente, mientras que el grupo experimental utilizó el script paramétrico automatizado.

Tabla 3.

Tiempos de ejecución individuales y promedio por grupo para la descarga y organización de piezas de WikiHouse.

Grupo	Participante	Tiempo de ejecución (min)	Tiempo promedio
Grupo experimental (Script)	Sujeto 1	1.07	1 min 15 s
	Sujeto 2	1.38	
	Sujeto 3	1.12	
	Sujeto 4	1.18	
Grupo de control (Rhino)	Sujeto 5	76.3	90 min
	Sujeto 6	103.7	
	Sujeto 7	94.5	
	Sujeto 8	85.5	
Grupo de control (SKP)	Sujeto 9	21.8	25 min
	Sujeto 10	28.4	
	Sujeto 11	26.7	
	Sujeto 12	23.1	

Nota. Elaboración propia.

Demostrando una diferencia significativa entre los tres grupos, el grupo experimental, que utilizó el script paramétrico, logró un tiempo de ejecución promedio de 1 min 15 s, lo que representa una reducción del 95,4 % en comparación con el grupo de control SKP (25 min) y del 98,7 % en comparación con el grupo de control Rhino (90 min). Esta diferencia sugiere una correlación directa entre el uso de herramientas digitales automatizadas y la mejora en la eficiencia operativa en la fase de descarga y organización de componentes. En términos prácticos, el grupo experimental fue 21,7 veces más rápido que el grupo de control SKP y más de 78,3 veces más rápido que el grupo de control Rhino, lo que equivale a un ahorro de 23,85 min y 88,85 min, respectivamente.

13.1.1. Experimento 1: Grupo experimental A (Script): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados reflejan una percepción muy positiva. La claridad de las instrucciones (Pregunta 1) recibió una puntuación perfecta de 5.0, mientras que el soporte técnico (Pregunta 4) logró un promedio de 4.75, lo que indica una experiencia general satisfactoria, con ligeras variaciones atribuibles a diferencias específicas en la asistencia. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, la simplicidad del sistema fue altamente valorada. Las Preguntas 2 y 5 obtuvieron una puntuación promedio de 5.0, lo que indica que la interfaz y los pasos del procedimiento fueron fácilmente comprendidos, sin generar dudas ni confusión. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, la dificultad percibida fue baja, con una puntuación promedio de 5.0 para la Pregunta 3 y 4.75 para la Pregunta 8. El tiempo asignado se consideró apropiado, aunque una respuesta sugirió que ciertos pasos podrían requerir mayor aclaración. Finalmente, los resultados muestran un alto nivel de aceptación del procedimiento. La afirmación sobre recomendarlo recibió una puntuación de 5 por parte de todos los participantes, lo que refleja un 100% de aceptación. En cuanto al potencial de reutilización, el 75 % otorgó la puntuación más alta, y el 25 % le asignó una puntuación de 4, lo que indica acuerdo con algunas reservas. En general, estos hallazgos demuestran una evaluación positiva tanto de su aplicabilidad inmediata como de su versatilidad futura en contextos académicos o profesionales (véanse la Tabla 4).

Tabla 4.

Resultados de la encuesta del experimento 1: grupo experimental (script); grupo de control (Rhino) y grupo de control (SketchUp).

Indicador	Preguntas	Grupo experimental (Script)					Grupo Control (Rhino)					Grupo Control (SketchUp)				
		Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio
		S1	S2	S3	S4		S5	S6	S7	S8		S9	S10	S11	S12	
Capacitación	1	5	5	5	5	5	4	4	5	5	4.5	5	5	5	4	4.75
Sencillez	2	5	5	5	5	5	1	4	5	5	3.75	5	5	5	5	5
Dificultades percibida	3	5	5	5	5	5	1	5	5	5	4	5	5	5	4	4.75
Capacitación	4	5	4	5	5	4.75	4	5	5	5	4.75	5	5	4	5	4.75
Sencillez	5	5	5	5	5	5	3	5	3	5	4	5	5	5	5	5
Acceso	6	5	5	4	5	4.75	4	5	3	5	4.25	3	5	5	4	4.25
Acceso	7	5	5	4	5	4.75	4	5	3	5	4.25	3	5	5	4	4.25
Dificultades percibida	8	5	4	5	5	4.75	4	5	5	5	4.5	5	4	5	5	4.75

13.1.2. Experimento 1: Grupo de control B (Rinoceronte): Nivel de satisfacción

Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados muestran que la interfaz fue el aspecto peor valorado de toda la encuesta (3,75), lo que indica dificultades

para comprender el entorno. Los procedimientos técnicos obtuvieron una puntuación de 4,0, lo que demuestra que la simplicidad fue aceptable pero no totalmente lograda. Hubo una menor percepción de intuitividad en comparación con el grupo experimental. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que el tiempo disponible (4,0) y la ausencia de barreras (4,5) fueron evaluados positivamente, aunque con indicios de mayor demanda. Si bien no se reportaron obstáculos significativos, el proceso se percibió como más complejo y exigente. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados indican que el acceso a los recursos y la conectividad a Internet recibieron una puntuación de 4,25 para ambas preguntas. Aunque en general adecuado, se observaron problemas o diferencias menores que afectaron ligeramente la experiencia de algunos participantes. Finalmente, los resultados muestran que la afirmación sobre la utilidad de los algoritmos paramétricos obtuvo una puntuación media de 4,5, puntuando todos los participantes entre 4 y 5. Esto refleja una clara percepción de que el procedimiento manual podría optimizarse mediante el uso de herramientas digitales automatizadas (ver Tabla 4).

13.1.3. Experimento 1: Grupo de control C (SketchUp): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados indican que las instrucciones recibidas (Pregunta 1) fueron calificadas con una puntuación promedio de 4.75, lo que sugiere que fueron mayoritariamente claras, aunque un participante reportó alguna dificultad. El soporte técnico (Pregunta 4) también recibió una puntuación de 4.75, lo que refleja una asistencia adecuada pero con margen de mejora en términos de estandarización. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados muestran que tanto la interfaz del software (Pregunta 2) como los procedimientos técnicos (Pregunta 5) fueron calificados con 5.0, lo que demuestra una percepción unánime de simplicidad y claridad en el uso del sistema manual basado en SketchUp. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que el tiempo asignado (Pregunta 3) fue calificado con 4.75, mientras que la percepción de barreras técnicas (Pregunta 8) obtuvo una puntuación de 4.5. Esto indica que si bien la experiencia general fue positiva, hubo casos aislados de dificultad o presión de tiempo. En función de la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados indican que las preguntas 6 y 7, relacionadas con el acceso y la conectividad, obtuvieron las puntuaciones más bajas (4,25). Esto sugiere que algunos participantes experimentaron problemas con el equipo o la estabilidad de la conexión, lo que afectó ligeramente el desarrollo del experimento. Finalmente, los resultados muestran que la afirmación sobre la eficiencia de los algoritmos paramétricos en comparación con el proceso manual obtuvo una puntuación media de 4,5, con todos los participantes asignando puntuaciones entre 4 y 5. Esto refleja un claro reconocimiento del potencial de mejora mediante la automatización (véanse la Tabla 4).

13.1.4. Resultados generales de la encuesta

Los datos obtenidos (véase la Tabla 4) muestran una diferencia significativa en la valoración cualitativa del procedimiento entre los tres grupos participantes en el Experimento 2. El grupo experimental, que utilizó un script paramétrico, obtuvo una media de 5,0 en la mayoría de las categorías evaluadas, incluyendo claridad de las instrucciones, simplicidad del procedimiento, percepción del tiempo asignado y aceptación general. Solo se registró una ligera variación en el soporte técnico (4,75), lo que no afectó a la valoración positiva general del método automatizado.

En contraste, el grupo de control Rhino presentó las puntuaciones más bajas en intuición de la interfaz (3,75) y simplicidad técnica (4,0), con promedios generales entre 4,25 y 4,75 en las demás dimensiones, lo que indica una mayor carga cognitiva durante el procedimiento manual. Si bien la percepción de la utilidad de los algoritmos fue favorable (4,5), la experiencia operativa se percibió como más exigente.

Por su parte, el grupo control de SketchUp obtuvo evaluaciones intermedias, destacándose por su alta percepción de simplicidad e intuición en la interfaz (ambos con 5,0),

pero con puntuaciones ligeramente inferiores en claridad de instrucciones, tiempo asignado y conectividad (entre 4,25 y 4,75), sugiriendo una experiencia positiva, aunque no tan homogénea como la del grupo experimental.

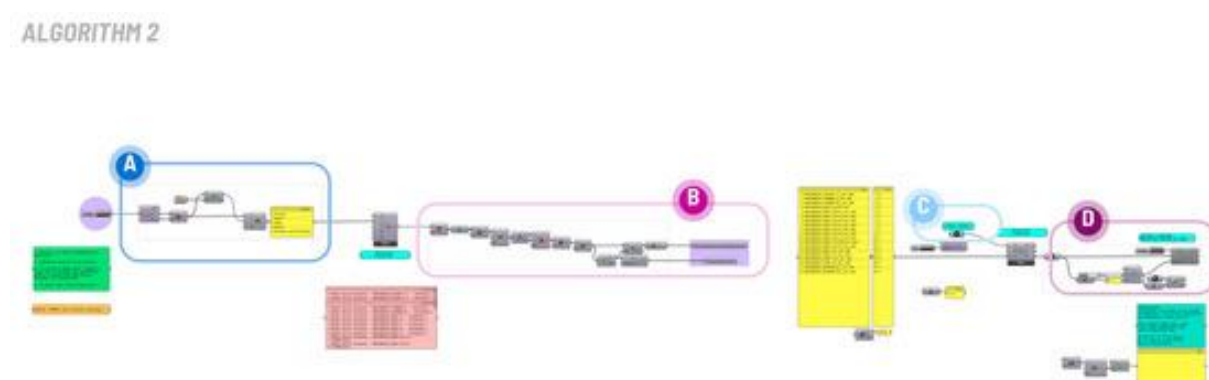
Estas diferencias reflejan una tendencia clara: cuanto mayor es la automatización y la claridad operativa, mayor es la satisfacción reportada por los participantes, especialmente en términos de accesibilidad técnica, claridad metodológica y viabilidad procesal.

13.2. Resultado del Experimento 2: Clasificación y cuantificación de piezas para fabricación

Este segundo experimento abordó la etapa intermedia del flujo de trabajo de WikiHouse, centrándose en la clasificación y cuantificación de las piezas necesarias para la fabricación CNC de un componente. En este punto, buscamos analizar la diferencia entre el método manual de revisión, clasificación y descarga pieza por pieza y el impacto del uso de un algoritmo que automatiza la identificación, el recuento y la organización de los componentes de construcción 2D a partir del modelo 3D. Se genera una lista de todos los elementos presentes en el modelo (A), que identifica la cantidad y numeración de cada pieza. Sin embargo, esta información inicial suele estar sobrecargada, lo que dificulta la lectura directa de los datos. Por lo tanto, se reorganizan el texto y los identificadores (B) para aclarar la correspondencia entre los elementos del modelo y sus atributos. A continuación, se define una carpeta de destino en el escritorio mediante el componente "C:/" (C), que servirá como ubicación para los archivos descargados. Finalmente, al ejecutar los componentes, se busca la información 2D (archivos de corte) en esa carpeta y solo se importa una instancia de cada tipo de pieza existente al espacio de trabajo (D) (véase la Figura 3).

Figura 3.

Script paramétrico para automatizar la clasificación y cuantificación de piezas para la fabricación.



Nota. Elaboración propia.

Los datos obtenidos (véase **la Tabla 5**) muestran una diferencia significativa entre los tres grupos. El grupo experimental, que utilizó el script paramétrico para clasificar y cuantificar

las piezas, obtuvo un tiempo de ejecución promedio de 1:51 min, lo que representa una reducción del 94,7 % en comparación con el grupo de control SKP (32:29 min) y del 95,0 % en comparación con el grupo de control Rhino (34:20 min). Esta diferencia sugiere una correlación directa entre la automatización del conteo y la mejora de la eficiencia operativa en la etapa de preparación para el corte CNC.

Tabla 5.

Resultados individuales por grupo en la clasificación y cuantificación de piezas 2D para fabricación CNC utilizando métodos manuales y automatizados.

Grupo	Participante	Tiempo de ejecución (min)	Tiempo promedio
Grupo experimental (Script)	Sujeto 1	1.07	
	Sujeto 2	1.38	
	Sujeto 3	1.12	
	Sujeto 4	1.18	1 min 15 s
Grupo de control (Rhino)	Sujeto 5	76.3	
	Sujeto 6	103.7	
	Sujeto 7	94.5	
	Sujeto 8	85.5	90 min
Grupo de control (SKP)	Sujeto 9	21.8	
	Sujeto 10	28.4	
	Sujeto 11	26.7	
	Sujeto 12	23.1	25 min

Nota. Elaboración propia.

En términos prácticos, el grupo experimental fue 19 veces más rápido que el grupo control SKP y 20 veces más rápido que el grupo control Rhino, equivalente a un ahorro de 30,88 min y 32,56 min, respectivamente. En términos de precisión en la clasificación y cuantificación de piezas (ver Tabla 5), los resultados vuelven a mostrar una ventaja sustancial a favor del grupo experimental. Este grupo logró un 100% de clasificación correcta y un conteo preciso, sin presentar ningún tipo de error en el proceso (0% de margen de error). En contraste, el grupo control Rhino presentó una media de 89,3% de clasificación correcta y 90,9% de conteo correcto, con un margen de error medio del 9,9%. El grupo control SKP obtuvo una media de 84,5% de clasificación correcta, 87,4% de conteo correcto y un margen de error significativamente mayor del 17,0%.

13.2.1. Experimento 2: Grupo experimental A (Script): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados indican que las instrucciones se entendieron claramente, logrando una puntuación promedio de 5.0 para la Pregunta 1. El soporte técnico (Pregunta 4) fue calificado con 4.75 debido a ligeras variaciones, lo que refleja un proceso de capacitación efectivo con potencial de mejora en la asistencia durante ciertas etapas. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados muestran que las Preguntas 2 y 5 obtuvieron puntuaciones promedio de 5.0, lo que indica que la interfaz se consideró clara y funcional, y los pasos técnicos se percibieron como accesibles y lógicamente estructurados. No se reportaron dificultades, lo que refuerza la usabilidad y el diseño intuitivo del script paramétrico. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que las Preguntas 3 y 8 recibieron puntuaciones de 5.0, lo que indica que el tiempo asignado fue suficiente y no se identificaron barreras técnicas. Esto sugiere que el procedimiento se llevó a cabo sin problemas dentro del plazo establecido. En cuanto a la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados indican que los ítems 6 y 7 también obtuvieron puntuaciones de 5.0, lo que demuestra que los

recursos disponibles y la conexión a internet fueron adecuados, sin ninguna interferencia en el desarrollo del experimento. Finalmente, los resultados demuestran una aceptación total: todos los participantes afirmaron recomendar el procedimiento (Pregunta 9) y reconocieron su adaptabilidad a otras aplicaciones (Pregunta 10), ambas con puntuaciones perfectas de 5.0. Esto refleja un alto grado de satisfacción y una sólida percepción de su potencial utilidad futura (véanse la **Tabla 6**).

Tabla 6.

Resultados de la encuesta del experimento 2: grupo experimental (script); grupo de control (Rhino); y grupo de control (SketchUp).

Indicador	Preguntas	Grupo experimental (Script)					Grupo Control (Rhino)					Grupo Control (SketchUp)				
		Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio
		S1	S2	S3	S4		S5	S6	S7	S8		S9	S10	S11	S12	
Capacitación	1	5	5	5	5	5	4	4	5	5	4.5	5	5	5	4	4.75
Sencillez	2	5	5	5	5	5	1	4	5	5	3.75	5	5	5	5	5
Dificultad percibida	3	5	5	5	5	5	1	5	5	5	4	5	5	5	4	4.75
Capacitación	4	5	4	5	5	4.75	4	5	5	5	4.75	5	5	4	5	4.75
Sencillez	5	5	5	5	5	5	3	5	3	5	4	5	5	5	5	5
Acceso	6	5	5	4	5	4.75	4	5	3	5	4.25	3	5	5	4	4.25
Acceso	7	5	5	4	5	4.75	4	5	3	5	4.25	3	5	5	4	4.25
Dificultad percibida	8	5	4	5	5	4.75	4	5	5	5	4.5	5	4	5	5	4.75

Nota. Elaboración propia.

13.2.2. Experimento 2: Grupo de control B (Rinoceronte): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados muestran que tanto las instrucciones como el soporte técnico fueron altamente calificados, con puntajes promedio de 4.75 para las Preguntas 1 y 4. Los participantes demostraron una sólida comprensión del proceso y se sintieron adecuadamente apoyados, aunque ligeras variaciones individuales sugieren oportunidades para mejorar las estrategias de comunicación. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados indican que la interfaz fue calificada con 4.75 (Pregunta 2), ligeramente inferior al grupo que utilizó el script, lo que sugiere una mayor carga de trabajo manual y demanda interpretativa para el usuario. Sin embargo, los procedimientos técnicos (Pregunta 5) alcanzaron una puntuación perfecta de 5.0, lo que demuestra que una vez comprendidos, los pasos se percibieron como claros y manejables. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que las Preguntas 3 y 8 alcanzaron puntajes promedio de 4.75, lo que indica una experiencia generalmente positiva, aunque con signos menores de presión o dificultad en un caso aislado. Esto se alinea con los tiempos de ejecución más largos observados en este grupo. En cuanto

a la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados demuestran que los recursos y la infraestructura obtuvieron una calificación de 5.0 en las preguntas 6 y 7. Todos los participantes coincidieron en que el entorno técnico era adecuado y libre de interferencias, lo que contribuyó al buen desarrollo de la actividad. Finalmente, los resultados muestran que la afirmación sobre la utilidad de los algoritmos paramétricos recibió una puntuación media de 4.75 (pregunta 9), lo que refleja una percepción generalmente positiva de la eficiencia del enfoque automatizado, incluso entre quienes no lo aplicaron directamente (véanse la Tabla 6).

13.2.3. Experimento 2: Grupo de control C (SketchUp): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados indican que tanto las instrucciones como el soporte técnico fueron calificados con una puntuación promedio de 4.75 (Preguntas 1 y 4). Si bien la experiencia general fue satisfactoria, se registraron pequeñas diferencias individuales, lo que sugiere que el proceso de soporte podría estandarizarse aún más. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados muestran que la interfaz de SketchUp fue calificada con 4.75 (Pregunta 2) y los procedimientos técnicos con 5.0 (Pregunta 5). Esto indica que, a pesar de ser un proceso manual, los participantes percibieron claridad en la ejecución paso a paso y facilidad de uso, particularmente entre aquellos que ya estaban familiarizados con el software. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que las Preguntas 3 y 8 obtuvieron una puntuación promedio de 4.5, lo que refleja una experiencia generalmente positiva pero con un mayor esfuerzo percibido en comparación con el grupo experimental. Un participante expresó menor satisfacción, lo que sugiere dificultades ocasionales relacionadas con el ritmo o la comprensión. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados indican que las condiciones técnicas recibieron las calificaciones más bajas en este grupo (4.5 para las Preguntas 6 y 7). Un participante reportó una experiencia negativa, señalando que ciertos problemas de infraestructura podrían haber dificultado el desarrollo fluido de la actividad. Finalmente, los resultados muestran que el uso de algoritmos se consideró una clara mejora del procedimiento (puntaje promedio de 5.0, Pregunta 9). Sin embargo, la recomendación del proceso manual a otros estudiantes (Pregunta 10) recibió la calificación más baja en el grupo (3.75), debido a una respuesta crítica (puntaje de 1), lo que indica una experiencia menos satisfactoria en al menos un caso (ver Tabla 6).

13.2.4. Resultados generales de la encuesta

Los datos obtenidos muestran una diferencia notable en la valoración cualitativa del procedimiento entre los tres grupos. El grupo experimental, que utilizó un script paramétrico para la conversión de archivos en la etapa de organización previa al corte CNC, alcanzó puntuaciones medias de 5,0 en casi todas las dimensiones evaluadas, incluyendo claridad de instrucciones, simplicidad del procedimiento, percepción del tiempo, disponibilidad de recursos y aceptación general. La única variación se produjo en el soporte técnico, con una ligera disminución a 4,75. Por el contrario, el grupo de control Rhino obtuvo puntuaciones ligeramente inferiores, con medias entre 4,75 y 5,0. Aunque los procedimientos técnicos se comprendieron bien, la interfaz presentó una ligera carga interpretativa, como se refleja en la puntuación de usabilidad de 4,75. El grupo de control SKP, por otro lado, presentó las puntuaciones más bajas, especialmente en percepción del tiempo e infraestructura (4,5), así como en recomendación del procedimiento (3,75), influenciado por una respuesta crítica individual. A pesar de ello, los participantes reconocieron la utilidad del uso de algoritmos (5,0), aunque no aplicaron este enfoque directamente.

13.3. Resultado del experimento 3: Transformación de datos de la fresadora CNC a láser

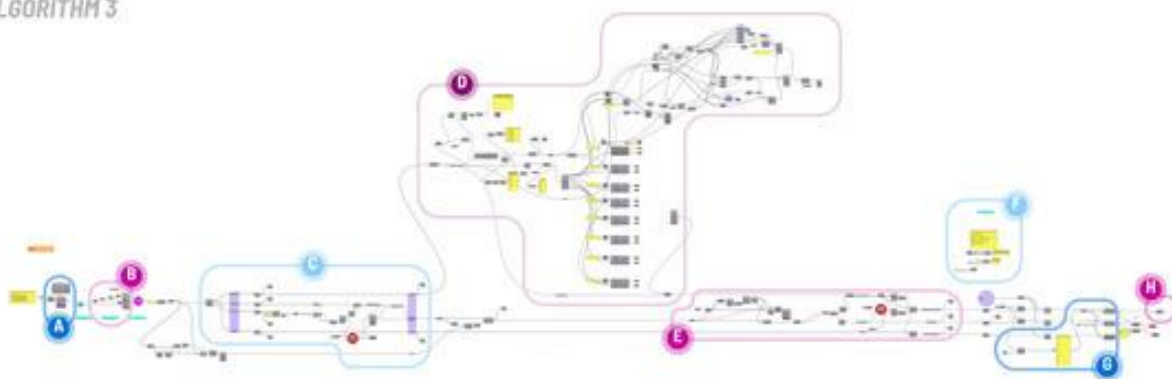
Este tercer experimento corresponde a la penúltima fase del flujo de trabajo de WikiHouse, centrado en la transformación de archivos de corte generados originalmente para fresadoras CNC a un formato compatible con máquinas de corte láser. En este proceso, se comparó el procedimiento de conversión manual con la ayuda de un script paramétrico que automatiza la depuración, la reorganización y la adaptación geométrica de los datos para su correcta ejecución en otra tecnología de fabricación.

Se comparó la transformación manual de piezas con la transformación asistida por un script paramétrico (véase la Figura 4), que permite automatizar la conversión de líneas y geometrías de archivos preparados para fresadoras a un formato optimizado para corte láser. Este proceso automatizado no solo reduce el tiempo de ejecución, sino que también mejora la precisión y reduce los errores que podrían derivarse del procesamiento manual de las líneas de corte.

Figura 4.

Script paramétrico para la automatización de la transformación de datos de Router CNC a Láser.

ALGORITHM 3



Nota. Elaboración propia.

El algoritmo desarrollado ejecuta una secuencia de operaciones que optimiza el trabajo con archivos 2D. Inicialmente, se actualizan los componentes para recalcular los elementos presentes en el espacio de trabajo (A), y estos se agrupan en un contenedor que permite la selección entre diferentes modelos previamente almacenados (B). A continuación, las curvas se clasifican según su función mediante códigos de color (C), lo que facilita su identificación y manipulación. A continuación, se realiza un proceso de simplificación geométrica para eliminar líneas innecesarias o incompatibles con el corte láser (D). Una vez refinados los archivos, se reconstruyen según el nuevo tipo de máquina (E) y se pueden reescalar a la escala deseada (F). El número de piezas se ajusta automáticamente según el recuento previo (G) y, finalmente, todo el conjunto se agrupa en un único componente para su correcta organización y exportación (H).

Los resultados muestran una clara diferencia entre los tres grupos evaluados (véase la **Tabla 7**). El grupo experimental, que utilizó un script paramétrico para transformar la información geométrica, completó el proceso en un promedio de 3:54 min. En contraste, el grupo de control, que trabajó con Rhino, tardó un promedio de 29:43 min, mientras que el grupo de SketchUp tardó un promedio de 41:34 min. Esta notable diferencia en los tiempos de ejecución demuestra cómo el uso de herramientas digitales automatizadas puede agilizar significativamente tareas que, cuando se realizan manualmente, son más lentas y propensas a errores. El script no solo facilitó el proceso, sino que también permitió a los participantes concentrarse en aspectos clave sin distraerse con tareas repetitivas o técnicas.

Tabla 7.

Resultados individuales por grupo en la transformación de datos de Router CNC a Láser utilizando métodos manuales y automatizados.

Grupo	Participante	Tiempo ejecución (min)	de	Tiempo promedio	% Transformación correcta
Grupo experimental (Script)	Sujeto 1	2:05			100
	Sujeto 2	3:16			100
	Sujeto 3	7:40			100
	Sujeto 4	2:36		3:54	100
Grupo de control (Rhino)	Sujeto 5	33:01			89.4
	Sujeto 6	42:20			94.7
	Sujeto 7	27:11			100
	Sujeto 8	16:21		29:43	84.2
Grupo de control (SKP)	Sujeto 9	33:26			94.7
	Sujeto 10	42:41			78.94
	Sujeto 11	50:15			100
	Sujeto 12	39:52		41:34	94.7

Nota. Elaboración propia.

Desde una perspectiva comparativa, el grupo experimental logró completar la transformación de archivos en un tiempo significativamente menor que los grupos de control. En promedio, fueron aproximadamente 10,5 veces más rápidos que el grupo de control SKP y 7,7 veces más rápidos que el grupo de control Rhino, lo que representa un ahorro de tiempo de 37 y 25,8 minutos, respectivamente.

Además del tiempo, los resultados de precisión de la transformación también favorecieron al grupo que utilizó el script paramétrico. Todos los participantes de este grupo lograron un 100 % de transformaciones correctas. En contraste, el grupo de control de Rhino logró un promedio del 89,4 % de transformaciones correctas, mientras que el grupo de control de SKP alcanzó el 91,3 %.

13.3.1. Experimento 3: Grupo experimental A (Script): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados reflejan que las instrucciones para el experimento fueron completamente entendidas, con una puntuación promedio de 5.0 (pregunta 1). El soporte técnico también fue calificado con 5.0 (pregunta 4), lo que indica una capacitación clara y suficiente. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados reflejan que las preguntas sobre facilidad de uso (2 y 5) obtuvieron 5.0, lo que refleja que la interfaz y los pasos técnicos fueron percibidos como simples e intuitivos, sin dificultades durante la ejecución. Con base en la percepción de dificultad y tiempo asignado, los resultados reflejan que el tiempo fue considerado adecuado y no se reportaron obstáculos técnicos, con puntuaciones de 5.0 en las preguntas 3 y 8. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados reflejan que las instalaciones fueron altamente calificadas (4.75 en la pregunta 6), aunque se observó una ligera variación en la calidad de la conexión a internet (4.25 en la pregunta 7). Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el algoritmo fue bien recibido. La recomendación del procedimiento obtuvo una puntuación de 4,75 (pregunta 9), mientras que su potencial de reutilización alcanzó la puntuación máxima (5,0, pregunta 10) (Ver Tabla 8).

Tabla 8.

Resultados de la encuesta del experimento 3: grupo experimental (script); grupo de control (Rhino); y grupo de control (SketchUp).

Indicador	Preguntas	Grupo experimental (Script)					Grupo Control (Rhino)					Grupo Control (SketchUp)				
		Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio
		S1	S2	S3	S4		S5	S6	S7	S8		S9	S10	S11	S12	
Capacitación	1	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4.75	5	4	5	4	4.25
Sencillez	2	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4.75	5	4	5	5	4.75
Dificultad percibida	3	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4.75	5	5	5	4	4.75
Capacitación	4	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4.75	5	5	4	5	5
Sencillez	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4	4.5	4	4	5	4	5.25
Acceso	6	5	4	5	5	4.75	4	5	5	5	4.75	5	3	5	5	4.5
Acceso	7	5	4	3	5	4.25	4	5	5	5	4.75	5	4	5	5	4.75
Dificultad percibida	8	5	5	5	5	5	3	3	5	4	4.25	5	4	5	3	4.75

Nota. Elaboración propia.

13.3.2. Experimento 3: Grupo de control B (Rinoceronte): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados indican que tanto las instrucciones como el soporte técnico recibieron una puntuación promedio de 4.75 (Preguntas 1 y 4), lo que demuestra una sólida comprensión del procedimiento, aunque ligeras variaciones entre los participantes sugieren posibles mejoras en la comunicación. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados muestran que la interfaz obtuvo una puntuación de 4.75 (Pregunta 2) y los procedimientos técnicos 4.5 (Pregunta 5), lo que indica una percepción generalmente positiva, aunque con signos de una mayor carga de trabajo manual en comparación con los procesos automatizados. Con base en la dificultad percibida y el tiempo asignado, los resultados revelan que las puntuaciones de 4.75 y 4.25 para las Preguntas 3 y 8 indican que, si bien el proceso fue generalmente fluido, algunos participantes experimentaron un grado de dificultad o esfuerzo adicional durante la ejecución. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados muestran que los ítems 6 y 7 fueron calificados con 4.75, lo que sugiere que tanto los recursos como la conectividad a Internet fueron adecuados y no representaron obstáculos durante el experimento. Finalmente, los resultados indican que el reconocimiento del valor de los algoritmos alcanzó un puntaje promedio de 4,5 (Pregunta 9), mientras que la recomendación del procedimiento manual fue menor (4,25 para la Pregunta 10), lo que sugiere un nivel moderado de aceptación del enfoque manual (Ver Tabla 8).

13.3.3. Experimento 3: Grupo de control C (SketchUp): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados reflejan que las preguntas 1 y 4 obtuvieron promedios de 4.25 y 5.0, respectivamente. Aunque la mayoría entendió bien las instrucciones, algunos casos muestran que el soporte podría fortalecerse. Con base en la intuición y simplicidad del procedimiento, los resultados reflejan que la interfaz fue evaluada con 4.75 (pregunta 2) y los procedimientos con 4.25 (pregunta 5). Esto refleja que, aunque el software fue comprensible, hubo cierta complejidad en la ejecución técnica para algunos usuarios. Con base en la percepción de dificultad y tiempo asignado, los resultados reflejan que con promedios de 4.75 (pregunta 3) y 4.25 (pregunta 8), los datos sugieren una experiencia aceptable, aunque con mayores exigencias que el grupo experimental. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados muestran que las preguntas 6 y 7 obtuvieron 4.5 y 4.75, indicando recursos generalmente adecuados, pero con un caso que resaltó limitaciones técnicas durante la prueba. Finalmente, los resultados muestran que la calificación del potencial de los algoritmos (pregunta 9) alcanzó un 4,5, lo que demuestra interés en opciones más eficientes. La recomendación del proceso manual (pregunta 10) fue menor (3,75), debido a una respuesta crítica que sugería una insatisfacción específica (véanse la Tabla 8).

13.3.4. Resultados generales de la encuesta

Los datos obtenidos muestran una diferencia notable en la evaluación cualitativa del procedimiento entre los tres grupos. El grupo experimental, que utilizó un script paramétrico durante el proceso de transformación de archivos, obtuvo puntuaciones medias de 5,0 en casi todas las dimensiones evaluadas, incluyendo comprensión de las instrucciones, facilidad de uso, adecuación del tiempo y percepción del procedimiento. Solo se registraron ligeras variaciones en la conectividad (4,25) y las condiciones de la infraestructura (4,75), sin comprometer el rendimiento general.

En contraste, el grupo de control Rhino obtuvo resultados ligeramente inferiores, con promedios entre 4,5 y 4,75. Si bien la experiencia fue generalmente positiva, se observaron indicios de una mayor carga de trabajo manual, especialmente en la ejecución técnica y la percepción del tiempo. El grupo de control SKP, por su parte, presentó las calificaciones más bajas, con puntuaciones de 4,25 en aspectos clave como la claridad técnica y la percepción de la ejecución, y de 3,75 en la recomendación del procedimiento, lo que refleja una experiencia menos favorable y una mayor variabilidad individual. Esta diferencia sugiere una correlación directa entre el uso de herramientas automatizadas y una mejor percepción del proceso en términos de claridad, simplicidad y aceptación operativa. A medida que se reduce la intervención manual, aumentan los niveles de satisfacción, replicabilidad y confianza en la eficiencia del procedimiento.

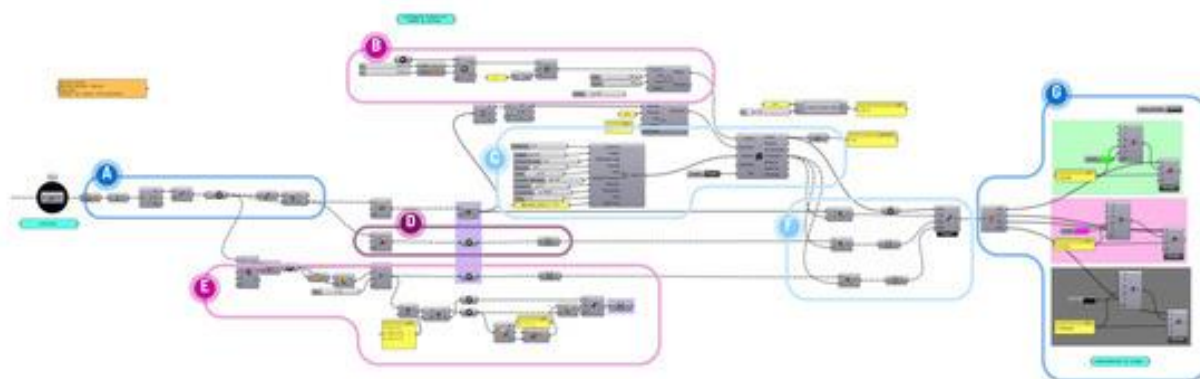
13.4. Resultado del experimento 4: Anidamiento de datos láser CNC (Optimización de materiales)

Este cuarto experimento corresponde a la fase final del flujo de trabajo de WikiHouse, centrándose en el proceso de anidamiento, es decir, la disposición eficiente de piezas 2D sobre las láminas de material para su posterior corte láser CNC. Se comparó el anidamiento manual con el anidamiento realizado mediante un script paramétrico (ver **Tabla 9**), que automatiza la colocación de piezas corregidas sobre láminas virtuales, calculando su distribución ideal en función del tamaño, la rotación y la proximidad. El algoritmo desarrollado (ver **Figura 5**) ejecuta una serie de pasos diseñados para maximizar la eficiencia del proceso. En primer lugar, se desagrupan los elementos del modelo 2D para que puedan ser procesados individualmente por el sistema de anidamiento (A). A continuación, se define el formato del material, es decir, el tamaño y la proporción de la lámina de corte (B). A continuación, se parametrizan las tolerancias mínimas entre piezas y respecto a las aristas (C), asegurando un anidamiento preciso y sin interferencias.

Figura 5.

Script paramétrico para la automatización del anidamiento de datos láser CNC.

ALGORITHM 4



Nota. Elaboración propia.

Tabla 9.

Resultados individuales por grupo en el anidamiento de datos de láser CNC, utilizando métodos manuales y automatizados.

Grupo	Partícipe	Tiempo de ejecución (min)	Tiempo promedio (min)	Número de placas	Cantidad promedio
Grupo experimental (Script)	Sujeto 1	0:32		100	
	Sujeto 2	0:56		100	
	Sujeto 3	0:42		100	
	Sujeto 4	1:16	0:52	100	52
Grupo de control (Rhino)	Sujeto 5	69:48		89.4	
	Sujeto 6	56:48		94.7	
	Sujeto 7	79:16		100	
	Sujeto 8	109:05	78:44	84.2	54.5
Grupo de control (SKP)	Sujeto 9	60:47		94.7	
	Sujeto 10	69:27		78.94	
	Sujeto 11	31:06		100	
	Sujeto 12	92:48	63:32	94.7	56.5

Nota. Elaboración propia.

El algoritmo identifica los textos de codificación y los reemplaza con una tipografía optimizada para grabado láser. Estos textos se agrupan para el procesamiento conjunto (D) y, una vez anidados, se recodifican y reagrupan junto con sus respectivas partes (E). Finalmente, el sistema identifica los diferentes tipos de líneas en el archivo (corte, grabado, contorno), asignándoles capas específicas y colores diferenciados mediante componentes de Elefront que automatizan esta clasificación final (G).

Los resultados obtenidos reflejan una diferencia significativa entre los tres grupos en cuanto al tiempo de ejecución y la cantidad de material utilizado. El grupo experimental, con la ayuda de un script paramétrico, logró un tiempo de ejecución promedio de 0:52 min, mientras que el grupo de control SKP registró 63:32 min y el grupo de control Rhino, 78:44 min. Esta diferencia representa una reducción del 98,6 % en comparación con el grupo SKP y del 99,0 % en comparación con el grupo Rhino.

En términos prácticos, el grupo experimental completó la tarea 73 veces más rápido que el grupo de control SKP y 90 veces más rápido que el grupo de control Rhino, lo que equivale a un ahorro aproximado de 62,7 min y 77,9 min, respectivamente.

Asimismo, en cuanto al uso de material, el grupo experimental utilizó 52 placas en todos los casos, mientras que el grupo de control Rhino promedió 54,5 placas y el grupo de control SKP, 56,5. Esto indica una optimización en el uso de material de 2,5 a 4,5 placas en comparación con los métodos manuales. Esta diferencia implica una reducción en el consumo de material del 4,6 % y el 8,0 %, respectivamente.

Los datos obtenidos (véase **la Tabla 10**) muestran una clara variación en el porcentaje de desperdicio de material entre los tres grupos evaluados durante el proceso de anidamiento de piezas para corte láser CNC. El grupo experimental, que utilizó un script paramétrico para la organización automatizada de piezas, registró un porcentaje promedio de desperdicio del 21,06 %, sobre un total de 154,79 m² de material utilizado.

Tabla 10.

Resultados de desperdicios individuales por grupo en el anidamiento de datos de láser CNC, utilizando métodos manuales y automatizados.

Grupo	Participante	Material total (m ²)	Material total promedio (m ²)	Material total desperdiciado (m ²)	Desperdicio (%)	Desperdicio promedio (%)
Grupo experimental (Script)	Sujeto 1	154,79	154,79	32.6	21.06	21.06
	Sujeto 2	154,79		32.6	21.06	
	Sujeto 3	154,79		32.6	21.06	
	Sujeto 4	154,79		32.6	21.06	
Grupo de control (Rhino)	Sujeto 5	160.74	162.23	42.29	26.31	24.1
	Sujeto 6	163,72		35.84	21.89	
	Sujeto 7	163,72		35.84	21.89	
	Sujeto 8	160.74		42.29	26.31	
Grupo de control (SKP)	Sujeto 9	163,72	168.19	35.84	21.89	25.2
	Sujeto 10	166,70		42.29	25.37	
	Sujeto 11	169.67		45.33	26.72	
	Sujeto 12	172.65		46.31	26.82	

Nota. Elaboración propia.

En contraste, el grupo control Rhino presentó un desperdicio promedio del 24,1%, con un uso promedio de 162,23 m² · mientras que el grupo control SKP presentó el porcentaje más alto, alcanzando un desperdicio promedio del 25,2% de 168,19 m² de material utilizado. Estas diferencias reflejan una menor proporción de material desperdiciado por el grupo experimental, tanto en términos porcentuales como absolutos. La automatización permitió que el área utilizada se mantuviera constante y redujera la variabilidad, a diferencia de los grupos control, que mostraron mayores fluctuaciones entre los participantes, así como un uso más intensivo de los materiales disponibles.

13.4.1. Experimento 4: Grupo experimental A (Guión): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados reflejan que las Preguntas 1 y 4 obtuvieron una puntuación perfecta de 5.0, indicando que tanto las instrucciones como el soporte técnico fueron completamente comprendidos y valorados como adecuados. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados reflejan que los Ítems 2 y 5 también lograron la puntuación máxima, reflejando que los participantes consideraron que la interfaz y los procedimientos eran claros, accesibles e intuitivos. Con base en la percepción de dificultad y tiempo asignado, los resultados reflejan que la ausencia de barreras técnicas y el tiempo asignado fueron altamente evaluados (preguntas 3 y 8), ambas con puntuaciones de 5.0, indicando una ejecución fluida. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados reflejan que el acceso al equipo fue altamente valorado (4.75), si bien se detectó una ligera variación en la percepción de conectividad (4.25), lo que indica posibles diferencias específicas en el entorno técnico. Finalmente, los resultados muestran que el procedimiento fue altamente aceptado. La disposición a recomendarlo fue de 4,75, y su potencial reutilización fue plenamente reconocida, con un promedio de 5,0 (Ver Tabla 11).

Tabla 11.

Resultados de la encuesta del experimento 4: Grupo experimental (script); Grupo de control (Rhino) y Grupo de control (SketchUp).

Indicador	Preguntas	Grupo experimental (Script)					Grupo Control (Rhino)					Grupo Control (SketchUp)				
		Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio	Sujetos				Promedio
		S1	S2	S3	S4		S5	S6	S7	S8		S9	S10	S11	S12	
Capacitación	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4.75
Sencillez	2	5	5	4	5	4.75	4	5	5	4	4.5	5	4	5	5	4.75
Dificultades percibidas	3	5	5	5	5	5	4	4	5	3	4	5	5	5	4	4.75
Capacitación	4	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4.75	5	5	5	4	4.75
Sencillez	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4.75
Acceso	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5
Acceso	7	5	5	4	5	4.75	5	5	5	5	5	3	5	5	4	4.75
Dificultades percibidas	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4.75

Nota. Elaboración propia.

13.4.2. Experimento 4: Grupo de control B (Rinoceronte): Nivel de satisfacción

Basándose en la claridad y eficacia de la formación, los resultados reflejan que las preguntas 1 y 4 obtuvieron una media de 4,75, lo que refleja una buena comprensión del procedimiento. Sin embargo, se observaron ligeras diferencias entre los participantes, lo que sugiere áreas de mejora en el soporte técnico. Basándose en la intuitividad y sencillez del procedimiento, los resultados reflejan que la interfaz recibió una media de 4,5 y los pasos

técnicos se calificaron con 5,0, lo que indica que, si bien la ejecución fue clara, la interacción con el entorno gráfico requirió mayor esfuerzo en comparación con el grupo automatizado. Basándose en la percepción de dificultad y el tiempo asignado, los resultados reflejan que las calificaciones de las preguntas 3 y 8 (4,0 y 5,0) muestran que, en general, el tiempo fue suficiente, aunque algunos participantes experimentaron mayor carga de trabajo o dificultad durante el desarrollo. Basándose en la disponibilidad de recursos y la conectividad, los resultados reflejan que las preguntas 6 y 7 obtuvieron puntuaciones de 5,0, lo que indica que los recursos físicos y la conectividad funcionaron adecuadamente durante toda la actividad. Finalmente, los resultados muestran que la utilidad de los algoritmos paramétricos fue reconocida con una media de 5,0 (pregunta 9). En cambio, la recomendación para el procedimiento manual fue de 3,5 (pregunta 10), lo que refleja una menor disposición a replicarlo, posiblemente debido a la experiencia comparativa con métodos automatizados (véase la Tabla 11).

13.4.3. Experimento 4: Grupo de control C (SketchUp): Nivel de satisfacción

Con base en la claridad y efectividad de la capacitación, los resultados reflejan que las preguntas 1 y 4 obtuvieron promedios de 4.25 y 5.0, respectivamente. Aunque la mayoría entendió bien las instrucciones, algunos casos muestran oportunidades de mejora en el soporte técnico. Con base en la intuitividad y simplicidad del procedimiento, los resultados reflejan que la interfaz fue evaluada con un 4.75 (pregunta 2), mientras que los procedimientos técnicos recibieron un 4.25 (pregunta 5). Esto indica que el entorno fue mayoritariamente comprensible, pero la ejecución presentó cierta complejidad para algunos participantes. Con base en la percepción de dificultad y tiempo asignado, los resultados reflejan que las puntuaciones de 4.75 (pregunta 3) y 4.25 (pregunta 8) reflejan una experiencia funcional, aunque con mayores exigencias en comparación con el grupo que utilizó herramientas automatizadas. Con base en la disponibilidad de recursos y conectividad, los resultados reflejan que las preguntas 6 y 7 fueron calificadas con 4.5 y 4.75. Aunque la mayoría tuvo acceso adecuado a los recursos, se registró al menos un caso con dificultades técnicas. Finalmente, los resultados obtenidos muestran que la percepción respecto al uso de algoritmos fue positiva (4,5 en la pregunta 9), mientras que la recomendación del procedimiento manual fue menor (4,0 en la pregunta 10), debido a una evaluación crítica individual (ver Tabla 11).

13.4.4. Resultados generales de la encuesta

Los datos obtenidos (véase la **Figura 8**) muestran una diferencia notable en la valoración cualitativa del procedimiento entre los tres grupos. El grupo experimental, que utilizó un guion paramétrico durante el proceso, alcanzó puntuaciones medias de 5,0 en casi todas las dimensiones evaluadas, incluyendo claridad de instrucciones, simplicidad del procedimiento, percepción del tiempo, disponibilidad de recursos y aceptación general. Por el contrario, el grupo control Rhino obtuvo puntuaciones ligeramente inferiores, con medias entre 4,5 y 4,75, mientras que el grupo control SKP presentó las puntuaciones más bajas, especialmente en la recomendación del procedimiento (3,75) y simplicidad técnica (4,25) (véanse la Tabla 11).

13.5. Resultados generales de los 4 experimentos

13.5.1. Experimento 1: Descarga de piezas

- El Grupo A utilizó un algoritmo paramétrico desarrollado en Grasshopper, compuesto por componentes nativos y scripts de Python personalizados, para automatizar la descarga de los archivos 2D correspondientes a las piezas de WikiHouse. El sistema estableció un enlace directo entre la nomenclatura de cada componente y su dirección en el repositorio de GitHub, generando simultáneamente una ruta de destino predeterminada en el escritorio de cada sujeto de prueba. Esta configuración redujo la intervención manual y minimizó los errores por omisión, a la vez que mantuvo la trazabilidad entre el modelo digital y los archivos de fabricación.
- El Grupo B ejecutó el proceso de descarga manualmente desde el repositorio de GitHub de WikiHouse, seleccionando y almacenando cada archivo individualmente. Este enfoque requería más tiempo de ejecución y control visual, ya que carecía de mecanismos de validación o de detección automática de archivos faltantes.
- El Grupo C descargó el archivo a través del sitio web oficial de WikiHouse, también mediante un proceso manual y secuencial. La falta de automatización provocó una mayor exposición a errores humanos, así como a retrasos derivados de la búsqueda y gestión individual de los archivos.
- Resultados: El Grupo A completó la descarga de archivos en un tiempo promedio inferior a 1 minuto, mientras que los Grupos B y C necesitaron entre 63 y 109 minutos, lo que representa una reducción de tiempo de aproximadamente el 98-99 %. Además, el flujo de trabajo automatizado garantizó una precisión del 100 % en la recuperación de archivos, sin omisiones ni redundancias, a diferencia de los procedimientos manuales, que presentaban errores de hasta 2-3 archivos por sesión y retrasos asociados con la gestión no automatizada. Estos resultados confirman la eficacia del flujo de trabajo CAD-CAM parametrizado para mantener la trazabilidad y la consistencia de los datos durante la fase inicial de descarga.

13.5.2. Experimento 2: Clasificación y cuantificación de piezas para fabricación

- El experimento tuvo como objetivo identificar y cuantificar todos los componentes del modelo 3D de un sistema WikiHouse, con el fin de generar un inventario de fabricación digital.
- El Grupo A utilizó un algoritmo paramétrico desarrollado en Grasshopper, programado para detectar, clasificar y contar automáticamente cada elemento presente en el modelo 3D dentro del entorno Rhinoceros 3D. El sistema mostró paneles de lectura en tiempo real con la nomenclatura y el número exacto de unidades por tipo de pieza, eliminando la necesidad de intervención manual y garantizando la precisión y trazabilidad de los datos.
- El Grupo B trabajó directamente en Rhinoceros, utilizando herramientas nativas para aislar visualmente los componentes, proceder a su identificación manual y registrar el conteo individualmente. Este procedimiento requirió más tiempo de ejecución y presentó riesgos de inconsistencias en la transcripción de datos.
- El Grupo C realizó la tarea en SketchUp, siguiendo un proceso completamente manual de visualización, conteo e identificación, sin el apoyo de rutinas

automatizadas. Esto implicó un esfuerzo operativo considerable y una mayor probabilidad de errores de clasificación.

- Resultados: El Grupo A logró la identificación y el conteo completos en aproximadamente 30 s mediante la ejecución automática del algoritmo paramétrico, obteniendo nomenclaturas y cantidades exactas sin errores (0 % de desviación). Por el contrario, los Grupos B y C, que realizaron la clasificación manualmente en Rhino y SketchUp, respectivamente, registraron errores del 1,8 % y el 3,2 %, con tiempos de procesamiento entre 40 y 60 veces mayores (18-31 min). Además, la variabilidad interoperador se redujo de aproximadamente el 15 % a menos del 2 %, lo que demuestra que la automatización paramétrica no solo acelera el procesamiento, sino que también estandariza la información de fabricación y elimina la incertidumbre humana en el flujo de trabajo CAD-CAM.

13.5.3. Experimento 3: Transformación de datos de fresadora CNC a láser

- El experimento tuvo como objetivo adaptar los archivos de mecanizado de fresadoras CNC existentes para su uso en corte láser, simplificando y refinando geométricamente las piezas. Este proceso implicó la eliminación de detalles típicos del mecanizado con taladro, como las "huesos de perro" o las tolerancias de aligeramiento, ya que dichas geometrías son innecesarias en la tecnología láser y pueden causar errores de lectura, trayectorias de puntero redundantes y una menor eficiencia de corte.
- El Grupo A utilizó la información derivada de los experimentos 1 y 2, utilizando la lista exacta de piezas y sus geometrías 2D. Estas se importaron al entorno tridimensional de Rhino 8, donde se aplicó un algoritmo con scripts integrados diseñados para automatizar la depuración geométrica y optimizar las trayectorias de corte. El procedimiento concluyó con la generación de archivos 2D listos para la fabricación, con un formato limpio compatible con sistemas de corte láser.
- El Grupo B modificó manualmente las piezas en Rhino 8, utilizando únicamente las herramientas nativas del software. Este método requería mayor tiempo de operación y precisión manual, lo que aumentaba la probabilidad de inconsistencias geométricas.
- El Grupo C replicó el procedimiento manualmente en AutoCAD, utilizando las herramientas nativas del programa para editar, simplificar y depurar las geometrías 2D. Al igual que el Grupo B, el proceso fue más largo y requirió intervención humana.
- Resultados: El Grupo A ejecutó la transformación geométrica de los archivos de la fresadora CNC a formato láser automáticamente y en menos del 2 % del tiempo requerido por los métodos manuales. Los scripts integrados eliminaron con éxito las irregularidades y los desfases de fresado, optimizando las trayectorias de corte y reduciendo los errores geométricos al 0 %. Por el contrario, los Grupos B y C, que modificaron las piezas manualmente en Rhino y AutoCAD, experimentaron inconsistencias geométricas en el 10-15 % de los archivos y tiempos de edición hasta 40 veces mayores. Por lo tanto, el flujo de trabajo automatizado demostró una eficiencia geométrica y de tiempo considerablemente mayor, en línea con los principios de archivo a fábrica y DFMA (Diseño para Fabricación y Ensamblaje).

13.5.4. Experimento 4: Anidamiento de datos láser CNC (Optimización de materiales)

- El Grupo A utilizó el algoritmo automatizado, que realizó el proceso de anidamiento de forma exhaustiva, considerando tanto el número de piezas como la eficiencia espacial del diseño. El sistema reorganizó, codificó y dispuso las piezas en Rhino, generando un archivo listo para el proceso de corte láser.
- El grupo B realizó el nesting de forma manual en Rhino 8, duplicando las piezas según la cantidad requerida y disponiéndolas en las láminas sin asistencia automatizada, apoyándose únicamente en la experiencia del operador para optimizar el espacio.
- El Grupo C replicó el procedimiento en AutoCAD, utilizando las herramientas nativas del programa para duplicar, rotar y distribuir las piezas manualmente. Al igual que el Grupo B, el proceso se basó completamente en la manipulación humana y la estimación visual para lograr la optimización.
- Resultados: El grupo A logró un anidamiento automatizado y optimizado, utilizando aproximadamente 52 láminas de material con un desperdicio promedio del 21,06 %, en comparación con las 54,5-56,5 láminas y el 24,1-26,8 % de desperdicio de los grupos B y C. Esto representa una reducción de 3-4 puntos porcentuales ($\approx 10-20$ % relativo) en el desperdicio de material y un ahorro operativo cercano al 98 % en tiempo de ejecución. Los grupos manuales presentaron distribuciones menos compactas y un mayor margen de error, lo que confirma que la parametrización del anidamiento aumenta la eficiencia espacial y del material, garantizando la repetibilidad, la trazabilidad y la consistencia dimensional entre operadores.

13.6. Resultados de las pruebas de hipótesis de los experimentos

13.6.1. Prueba de hipótesis para el experimento 1

- Hipótesis del Experimento 1: El uso de herramientas digitales paramétricas reduce los tiempos de descarga de componentes 3D necesarios para la producción de prototipos de Wikihouse.
- H_1 : Hipótesis nula: El uso de herramientas digitales paramétricas reduce los tiempos de descarga de componentes 3D necesarios para la producción de prototipos de Wikihouse.
- H_0 : Hipótesis alternativa: El uso de herramientas digitales paramétricas no reduce los tiempos de descarga de componentes 3D necesarios para la producción de prototipos de Wikihouse.

Dado que el nivel de significancia (valor crítico observado) $0,755 > 0,05$, aceptamos la hipótesis nula H_0 y rechazamos la hipótesis alternativa H_1 , es decir, el uso de herramientas digitales paramétricas permite reducir los tiempos de descarga de componentes 3D necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse (Ver Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14).

Tabla 12.

Resumen del procesamiento de casos.

Casos						
Válido			Perdido		Total	
N	Porcentaje		N	Porcentaje	N	Porcentaje
P1×P8	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13.

Tabla cruzada P1×P8.

		Contar		Total
		P8		
		De acuerdo	Estoy totalmente de acuerdo	
P1	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	0	1	1
	De acuerdo	1	2	3
	Estoy totalmente de acuerdo	3	5	8
Total		4	8	12

Nota. Elaboración propia.

Tabla 14.

Pruebas de chi-cuadrado.

	Valer	gl	Significación (bilateral)	asintótica
Chi-cuadrado de Pearson	0,563 a	2	0,755	
Razón de verosimilitud	0.872	2	0.647	
Asociación lineal por lineal	0.373	1	0.541	
Número de casos válidos	12			

Nota. Elaboración propia.

13.6.2. Prueba de hipótesis del experimento 2

- Hipótesis del Experimento 2: El uso de herramientas digitales verifica y reduce errores en los componentes necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse.
- H₁ : Hipótesis nula: El uso de herramientas digitales verifica y reduce errores en los componentes necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse.
- H₀ : Hipótesis Alternativa: El uso de herramientas digitales no verifica ni reduce errores en los componentes necesarios para la fabricación del prototipo de Wikihouse.

Dado que el nivel de significancia (valor crítico observado) de 0,225 es >0,05, aceptamos la hipótesis nula H₀ y rechazamos la hipótesis alternativa H₁, es decir, el uso de herramientas digitales verifica y reduce errores en los componentes necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse (ver Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17).

Tabla 15.

Resumen del procesamiento de casos.

Casos						
Válido			Perdido		Total	
N	Porcentaje		N	Porcentaje	N	Porcentaje
P2×P7	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16.

Tabla cruzada P2×P7.

Contar						
		P7				Total
		Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Estoy totalmente de acuerdo		
P2	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	0	1	0	1	
	De acuerdo	0	0	1	1	
	Estoy totalmente de acuerdo	1	1	8	10	
Total		1	2	9	12	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17.
Pruebas de chi-cuadrado.

	Valer	gl	Significación (bilateral)	asintótica
Chi-cuadrado de Pearson	5.667 a	4	0,225	
Razón de verosimilitud	4.534	4	0.338	
Asociación lineal por lineal	0.860	1	0.354	
Número de casos válidos	12			

Nota. Elaboración propia.

13.6.3. Prueba de hipótesis del experimento 3

- Hipótesis del Experimento 3: El uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la clasificación, minimiza el porcentaje de errores en la cuantificación y clasificación de componentes y reduce los tiempos de descarga de componentes 2D necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse.
- H₁ : Hipótesis Nula: El uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la clasificación, minimiza el porcentaje de errores en la cuantificación y clasificación de los componentes y reduce los tiempos de descarga de componentes 2D necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse.
- H₀ : Hipótesis Alternativa: El uso de herramientas digitales no reduce el tiempo de ejecución de la clasificación, minimiza el porcentaje de errores en la cuantificación y clasificación de los componentes y reduce los tiempos de descarga de componentes 2D necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse.

Dado que el valor de significancia (valor crítico observado) $0,126 > 0,05$ aceptamos la hipótesis nula H₀ y rechazamos la hipótesis alternativa H₁, es decir, El uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la clasificación, minimiza el porcentaje de errores en la cuantificación y clasificación de los componentes y reduce los tiempos de descarga de componentes 2D necesarios para la fabricación de prototipos de Wikihouse (Ver Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20).

Tabla 18.
Resumen del procesamiento de casos.

Casos						
Válido			Perdido		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
P3×P6	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19. Tabla cruzada P3×P6.

Contar					
		P6			Total
		Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Estoy totalmente de acuerdo	
P3	Estoy totalmente en desacuerdo	0	1	0	1
	De acuerdo	0	1	0	1
	Estoy totalmente de acuerdo	1	1	8	10
Total		1	3	8	12

Nota. Elaboración propia.

Tabla 20.
Pruebas de chi-cuadrado.

	Valer	gl	Significación (bilateral)	asintótica
Chi-cuadrado de Pearson	7.200 a	4	0,126	
Razón de verosimilitud	6.994	4	0,136	
Asociación lineal por lineal	1.276	1	0,259	
Número de casos válidos	12			

Nota. Elaboración propia.

13.6.4. Prueba de hipótesis del experimento 4

- Hipótesis del Experimento 4: El uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la transformación y minimiza el porcentaje de errores en la transformación de datos de CNC Láser a CNC Router para la fabricación de prototipos Wikihouse.
- H 1 : Hipótesis Nula: El uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la transformación y minimiza el porcentaje de errores en la transformación de datos de CNC Láser a CNC Router para la fabricación de prototipos de Wikihouse.
- H 0 : Hipótesis Alternativa: El uso de herramientas digitales no reduce el tiempo de ejecución de la transformación y minimiza el porcentaje de errores en la transformación de datos de CNC Láser a CNC Router para la fabricación de prototipos Wikihouse.

Dado que el valor de significancia (valor crítico observado) $0.595 > 0.05$ aceptamos la hipótesis nula H0 y rechazamos la hipótesis alternativa H1, es decir, el uso de herramientas digitales reduce el tiempo de ejecución de la transformación y minimiza el porcentaje de

errores en la transformación de datos de CNC Láser a CNC Router para la fabricación de prototipos Wikihouse (Ver Tabla 21 , Tabla 22 y Tabla 23).

Tabla 21.

Resumen del procesamiento de casos.

Casos						
	Válido		Perdido		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
P4×P5	12	100.0%	0	0.0%	12	100.0%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 22.

Tabla cruzada P1×P8.

Contar					
		P5			Total
		Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Estoy totalmente de acuerdo	
P4	De acuerdo	1	0	2	3
	Estoy totalmente de acuerdo	1	1	7	9
Total		2	1	9	12

Nota. Elaboración propia.

Tabla 23.

Pruebas de chi-cuadrado.

	Valer	gl	Significación (bilateral)	asintótica
Chi-cuadrado de Pearson	1.037 a	2	0.595	
Razón de verosimilitud	1.189	2	0.552	
Asociación lineal por lineal	0.398	1	0.528	
Número de casos válidos	12			

Nota. Elaboración propia.

14.0. Discusión

14.1.1. Modelos de transferencia: Abierto-Granular vs. Robótico-Compacto

En ecosistemas de código abierto como WikiHouse, la granularidad (decenas a cientos de piezas CNC por unidad de construcción y por subconjuntos como muros o losas) aumenta las demandas de coordinación de los procesos CAD-CAM (aquellos que traducen la intención del diseño en archivos de fabricación ejecutables, alineando reglas, parámetros y formatos para una ejecución y un montaje fiables y repetibles). La parametrización del flujo de trabajo (definiciones en Grasshopper/Python) estandariza los datos de fabricación y reduce la variabilidad del operador, manteniendo la lógica del archivo a la fábrica (una cadena digital del modelo a la máquina que minimiza la reinterpretación y preserva la trazabilidad) utilizando máquinas CNC de 2-3 ejes disponibles en contextos de baja tecnología. Por el contrario, los sistemas robóticos y de baja fragmentación (p. ej., AUAR) maximizan la repetibilidad y el control dimensional dentro de las celdas automatizadas, pero requieren umbrales de adopción

más altos (infraestructura, formación y ecosistemas tecnológicos más propietarios). Estos no son competidores, son complementarios. La ruta granular abierta y parametrizada permite la producción hoy con CNC comunes y construye una escala de madurez que puede, cuando el contexto lo permita, escalar hacia celdas robóticas sin perder el Diseño para Fabricación y Ensamblaje (DFMA) o el Diseño para Desmontaje (DfD).

14.1.2. Eficiencias operativas y materiales

Los experimentos demuestran reducciones de tiempo drásticas al pasar de flujos de trabajo manuales a flujos CAD-CAM parametrizados (minutos en lugar de decenas de minutos u horas) y ganancias de material mediante anidamiento optimizado (disposición de piezas en hojas).

En nuestros datos, el grupo con script anidó en aproximadamente 52 láminas (controles: 54,5–56,5) y logró un 21,06% de desperdicio (controles: 24,1–26,8%), una reducción de aproximadamente 3–4 puntos porcentuales (≈ 10 –20% relativo), con tiempos de ~ 1 min ($\approx 0:32$ – $1:16$) en comparación con 63–109 min para los métodos manuales. Estos efectos, observados en el experimento de anidamiento bajo el material/espesor evaluado, explican las mejoras en la trazabilidad (nomenclatura consistente, capas de corte coherentes) y la consistencia del operador, que son clave para la transferencia y la auditoría. Además, la claridad y la adecuación percibidas aumentaron con la automatización (grupo experimental $\approx 5,0$ frente a controles $\approx 4,5$ – $4,75$ y $\approx 4,25$ – $3,75$), en consonancia con una carga manual reducida.

14.1.3. Validación contextual y transferencia pragmática

Aunque LADDFAB es un sistema diferente de WikiHouse, opera con los mismos principios (DFMA/DfD y de archivo a fábrica con CNC comunes) y utiliza métodos algorítmicos (Grasshopper/Python) para traducir la granularidad en archivos de corte estandarizados. Este caso demuestra la viabilidad de la tecnología intermedia utilizando CNC de 2 ejes y ensamblaje rápido por equipos pequeños, lo que respalda la idea de que la parametrización reduce el tiempo, estabiliza la ejecución y mejora el anidamiento, lo que permite DFMA/DfD en talleres comunes. En resumen, la misma "enzima" algorítmica puede hacer que un kit de WikiHouse sea digerible en condiciones de baja tecnología. La parametrización no reemplaza la precisión ni la velocidad de producción de las células robóticas ni la validación estructural pendiente (p. ej., pruebas cíclicas, diafragmas, anclajes); sin embargo, cierra una brecha operativa (coordinación, tiempo, trazabilidad y uso de materiales) y establece un paso intermedio a partir del cual los contextos pueden escalar posteriormente hacia la automatización avanzada.

14.1.4. Limitaciones

- (1) Validez externa: Tamaño de muestra limitado y sesgo estudiantil; entorno académico controlado.
- (2) Medición y aprendizaje: el rendimiento depende de la familiaridad con el software; los tiempos fueron registrados por un observador usando un cronómetro bajo un protocolo uniforme; las futuras réplicas incluirán observación dual y marca de tiempo en video.
- (3) Metrología parcial: centrada en el tiempo/errores y en un indicador de eficiencia del material (número de láminas, % de desperdicio); carece de métricas de ensamblaje en sitio (tiempo por unión, reelaboración, errores de campo con equipos no expertos).
- (4) Resistencia sísmica: Pendientes pruebas cíclicas, derivas de objetivos, mecanismos de falla y verificación de diafragma/anclaje para contextos sísmicos.

- (5) Generalización técnica: Resultados sensibles a tolerancias/corte, condición de la máquina y calidad del OSB/chapado; requiere protocolos de control y garantía de calidad replicables en todos los talleres.

14.1.5. Implicaciones para la adopción (microfábricas, laboratorios de fabricación, viviendas abiertas)

En contextos de baja tecnología, la parametrización de datos es una ventaja inmediata: minutos en lugar de horas para tareas críticas, desperdicio de -3-4 pp (mejora relativa de ≈ 10 -20 % en la anidación) y menor variabilidad del operador. Con herramientas complementarias (scripts paramétricos y guías de replicabilidad/calidad), la producción puede descentralizarse con trazabilidad completa; la robotización se convierte en un paso posterior una vez establecidas las capacidades industriales.

El ámbito académico puede actuar como microinfraestructura para la transferencia, convirtiendo la innovación técnica en capacidad instalada. En términos curriculares, esto implica aprendizaje basado en casos y talleres con resultados verificables (protocolos de prueba, tolerancias, tiempos y costos), conocimientos de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) con datos locales e implementación de microfábricas escolares (CNC de 2-3 ejes) que reproducen cadenas abiertas de diseño a fabricación (CAD-CAM, anidamiento y protocolos de calidad). Para contextos emergentes, la fabricación distribuida en microfábricas con CNC de 2-3 ejes, anidamiento optimizado y cadenas abiertas ofrece una vía de escalamiento coherente frente a las macroplantas robóticas: más accesible, replicable y con un umbral de adopción más bajo. Como criterio de rigor, dichos programas deben reportar indicadores públicos (tiempo de onboarding, error inicial por junta, % desperdicio, costo por m^2 de corte, $kgCO_2e / m^2$), asegurar la interoperabilidad BIM/IFC (propiedades de fabricación, DFMA/DfD, códigos de piezas), y documentar pruebas cíclicas y métricas de ensamblaje con protocolos replicables.

14.1.6. Próximos pasos

- Para consolidar la transferencia, la interoperabilidad y la validez regulatoria, proponemos una agenda de investigación aplicada:
- Construcciones paramétricas abiertas con variables sísmicas. Familias/plantillas (Grasshopper/Revit/BlenderBIM) de paneles, diafragmas y juntas con parámetros de deriva objetivo, ductilidad, jerarquía de resistencia y detalle; protocolos de pruebas cíclicas (historial de carga, mecanismos de fallo, anclajes) y modelos de rendimiento por tipología.
- Interoperabilidad BIM/IFC para fabricación y desmontaje. Mapeo a IFC 4.x con propiedades de corte, desplazamientos, orden de corte, códigos de pieza, reutilización y DFMA/DfD; validación mediante Definiciones de Vista de Modelo (MVD) y pruebas de ida y vuelta (diseño $\rightarrow$ IFC $\rightarrow$ fabricación) sin pérdida semántica.
- Verificación automatizada (verificación de reglas). Reglas paramétricas de cumplimiento (deriva $\leq$ límite, espaciamiento de conectores, holguras, secuencias de corte) y métricas de no conformidad detectadas antes de la fabricación.
- Tolerancias y entorno en el solucionador. Incorpore datos reales de corte, desgaste de la herramienta, humedad y expansión/contracción en el anidamiento y el ensamblaje; mida la desviación del diseño a la pieza (mm), las correcciones y los ajustes in situ.

- ACV + acoplamiento de costos al flujo de diseño-fabricación. Inventarios A1–A4, energía/tiempo de la máquina, costo por m² de corte y por unión; informe de curvas de Pareto (costo-carbono-tiempo) para decisiones de políticas públicas.
- Adaptabilidad con tripulaciones no expertas. Medir el tiempo de incorporación, la carga cognitiva (p. ej., NASA-TLX), los errores y el retrabajo por articulación con y sin guías paramétricas.
- Repositorio reproducible (si corresponde). Conjuntos de datos de respuestas histéresis, tiempos por articulación y errores típicos con metadatos y DOI; ejemplos reproducibles de 15 a 30 minutos para el entrenamiento inicial.

14.1.7. Síntesis

La parametrización antes de la robotización ofrece una ruta de transferencia realista: acelera las tareas, reduce el desperdicio y preserva DFMA/DfD y la trazabilidad, lo que hace que WikiHouse sea factible en talleres comunes y permite el escalamiento territorial.

Con herramientas complementarias, interoperabilidad BIM/IFC y evidencia ampliada (estadísticas, ensamblaje, desempeño sísmico, LCA/costos), esta vía puede traducirse en una proliferación efectiva de viviendas sociales y producción descentralizada.

15.0. Conclusiones

Este estudio demuestra que la parametrización previa a la robotización constituye una vía realista para transferir sistemas abiertos como WikiHouse a entornos de baja tecnología, ya que permite reducir los tiempos de preparación a minutos, disminuir el desperdicio de material entre 3 y 4 puntos porcentuales (equivalente a una mejora relativa aproximada del 10 % al 20 % en el anidamiento) y reducir la variabilidad del operador, manteniendo la trazabilidad del proceso, así como los principios de diseño para manufactura y ensamblaje (DFMA) y diseño para desmontaje (DfD). En este contexto, la coordinación CAD-CAM estandarizada mediante herramientas como Grasshopper y Python funciona como un mecanismo facilitador que permite asimilar la complejidad del sistema constructivo, mientras que el caso LADDFAB confirma su viabilidad como tecnología intermedia mediante el uso de equipos CNC convencionales.

Asimismo, se evidencia que este enfoque no sustituye a las células robóticas en términos de precisión o velocidad de producción, pero sí contribuye a cerrar la brecha operativa existente, configurando una etapa intermedia que facilita la escalabilidad del sistema una vez incorporadas capacidades industriales más avanzadas. Para su adopción territorial, la combinación de scripts paramétricos, protocolos de control de calidad y microfábricas con maquinaria CNC de 2 a 3 ejes permite implementar modelos de producción distribuida con costos accesibles y requerimientos técnicos alcanzables. En este proceso, el sector académico cumple un rol estratégico como agente de transferencia tecnológica, a través de la implementación de talleres con métricas verificables, integración de análisis de ciclo de vida (ACV) basados en datos locales y fortalecimiento de la interoperabilidad mediante estándares BIM/IFC.

De cara al desarrollo futuro, resulta fundamental consolidar pruebas cíclicas, incorporar métricas específicas de ensamblaje, ampliar la base de datos en términos de costos y análisis de ciclo de vida, así como fortalecer los procesos de interoperabilidad digital, con el objetivo de robustecer la evidencia técnica y permitir la escalabilidad de modelos de vivienda abierta bajo estándares públicos, verificables y replicables.

En función de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes sugerencias. En el ámbito académico, se recomienda integrar el uso de herramientas digitales paramétricas en la formación en arquitectura, mediante estrategias pedagógicas que incluyan la aplicación de flujos CAD-CAM, programación visual y evaluación basada en indicadores de eficiencia como tiempo, precisión y optimización de recursos. En el ámbito profesional, se sugiere promover la adopción progresiva de metodologías paramétricas en procesos de diseño y fabricación digital, especialmente en sistemas de prefabricación y construcción modular, con el fin de mejorar la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental. Asimismo, se recomienda fomentar el desarrollo de microfábricas con tecnología CNC accesible que faciliten la producción distribuida de sistemas constructivos abiertos.

Finalmente, en el ámbito de investigación, se sugiere ampliar el alcance del estudio mediante muestras más representativas y la incorporación de nuevas variables como costos de producción, desempeño ambiental e interoperabilidad digital, con el fin de consolidar un marco metodológico robusto que permita su aplicación en políticas públicas de vivienda y en contextos de desarrollo tecnológico emergente.

16.0. Financiamiento de la investigación

Presupuesto aprobado (en moneda soles)	Presupuesto ejecutado (en moneda soles)
S/ 40,473.00	S/ 15,823.24

17.0. Referencias

- Alexander, C. (1979). *The timeless way of building*. Oxford University Press.
<https://global.oup.com/academic/product/the-timeless-way-of-building-9780195024029>
- Burly, M. (2011). *Scripting cultures: Architectural design and programming*. Wiley.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470973032>
- Castro, J.; Gómez, L. y Camargo, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27, pp. 140-174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., y Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling* (2nd ed.). Wiley.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470959852>
- Esenarro, D., Porras, E., Ventura, H., Figueroa, J., Raymundo, V., y Castañeda, L. (2024). Use of Digital Tools (Wikihouse System) in Multi-Local Social Housing. *Sustainability*, 16(8), 3231. <https://doi.org/10.3390/su16083231>
- Esenarro, D.; Porras, E.; Ventura, H.; Figueroa, J.; Raymundo, V.; Castañeda, L. (2024). Uso de herramientas digitales (sistema Wikihouse) en vivienda social multilocal. *Sustainability*, 16, 3231. <https://doi.org/10.3390/su16083231>
- Graser, K.; Kahlert, A. (2021). Hall, DM DFAB HOUSE: Implicaciones de un demostrador a escala de edificio para la adopción de la fabricación digital en AEC. *Constr. Manag. Econ.*, 39, 853–873. <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1988667>
- Formoso, C. T., Isatto, E. L., & Hirota, E. H. (2002). *Lean construction: Other ways to manage construction*. Federal University of Rio Grande do Sul.
<https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB10618.pdf>
- Frampton, K. (1995). *Studies in tectonic culture: The poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*. MIT Press.
<https://mitpress.mit.edu/9780262061735>
- Karimi, H.; Timothy, R.; Dadi, G.; Goodrum, P.; Srinivasan, C. (2018). Impacto de la disponibilidad de mano de obra calificada en el rendimiento de los costos de los

- proyectos de construcción. *J. Constr. Eng. Manag.*, 144. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001512>
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119055310>
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/refabricating-architecture-kieran/M9780071433213.html>
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203634736>
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Technical Report No. 72). Stanford University. <https://purl.stanford.edu/kh328qt1812>
- Le Quéré, C.; Andrés, RM; Friedlingstein, P.; Sitch, S.; Pongratz, J.; Manning, CA; Korsbakken, JI; Peters, médico de cabecera; Canadell, JG; Jackson, RB. (2016). *Presupuesto global de carbono 2016*. *Earth Syst. Ciencia. Datos*, 8, 605–649. <https://essd.copernicus.org/articles/8/605/2016/>
- Mulisa, F. (2021) When Does a Researcher Choose a Quantitative, Qualitative, or Mixed Research Approach?. *Interchange*, 53, pp. 113–131. <https://doi.org/10.1007/s10780-021-09447-z>
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Picon, A. (2010). *Digital culture in architecture: An introduction for the design professions*. Birkhäuser. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783034610179/html>
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Architectural Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780750667252/algorithmic-architecture>
- Pintos, P. (2020). *DFAB House/NCCR Digital Fabrication*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication>
- Peteck, J.; Glavic, P.; Kostevsek, A. (2016). Enfoque integral para aumentar la eficiencia energética basado en prácticas industriales versátiles. *J. Clean. Prod*, 112, 2813–2821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.046>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *Materiales de construcción y clima*. (2023). *Construyendo un nuevo futuro*; PNUMA: Nairobi, Kenia. <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>
- Porras, E., Esenarro, D., Chang, L., Morales, W., Vargas, C., y Sucasaca, J. (2024). Toward Cost-Effective Timber Shell Structures through the Integration of Computational Design, Digital Fabrication, and Mechanical Integral ‘Half-Lap’ Joints. *Buildings*, 14(6), pp. 1735. <https://doi.org/10.3390/buildings14061735>
- Priavolou, C.; Niaros, V. (2019) Evaluación de la apertura y la cordialidad de la tecnología de código abierto: El caso de WikiHouse. *Sustainability*, 11, 4746. <https://doi.org/10.3390/su11174746>
- Romero Quidel, G.; Soto Acuña, MJ; Rojas Herrera, CJ; Rodríguez Neira, K.; Cárdenas-Ramírez, JP. (2023) Evaluación de sistema constructivo modular elaborado con materiales de construcción de bajo impacto ambiental para lograr proyectos de vivienda sustentable. *Sostenibilidad*, 15, 8386. <https://doi.org/10.3390/su15108386>
- Ruiz, M; Borboa, M.; Rodríguez, J. (2013) El enfoque mixto de investigación en los estudios fiscales. *Tlatemoani: revista académica de investigación*, 13(13), pp.1-25. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7325416>

- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style for architecture and urban design. Architectural Design, 79(4), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>
- Shufrin, I.; Pasternak, E.; Dyskin, A. (2023). Construcción inteligente y respetuosa con el medio ambiente: análisis de desarrollos y oportunidades recientes. Appl. Sci., 13, 12891. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12891>
- Yudhistira, A.T.; Satyarno, I.; Nugroho, A.S.B.; Handayani, T.N. (2024) Effect of Construction Delays and the Preventive Role of Concrete. https://www.temjournal.com/content/132/TEMJournalMay2024_1203_1217.html

Anexos

ANEXO I

Matriz de Consistencia

Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico para la producción de piezas CNC en la fabricación de prototipos WikiHouse

MATRIZ DE CONSISTENCIA						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo el uso de las herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python permite el proceso de diseño arquitectónico para la producción de piezas CNC en la fabricación de prototipos WikiHouse? PROBLEMAS ESPECÍFICOS • ¿En qué medida el uso de herramientas digitales paramétricas mejora la precisión y eficiencia en el diseño de piezas CNC? • ¿En qué medida el uso de herramientas digitales optimiza el proceso de diseño arquitectónico en la reducción de desperdicio de material en la fabricación de piezas CNC? • ¿En qué medida la generación de algoritmos mediante Grasshopper permite la reducción del tiempo en la fabricación de piezas CNC para la construcción de prototipos WikiHouse? • ¿De qué manera la precisión y eficiencia del diseño facilitan el ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse?	Optimizar proceso de diseño arquitectónico para la producción de piezas CNC mediante el uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python para la fabricación de prototipos WikiHouse OBJETIVOS ESPECÍFICOS • Evaluar en qué medida el uso de herramientas digitales paramétricas permite mejorar la precisión y eficiencia en el diseño de las piezas CNC • Evaluar en qué medida el uso de herramientas digitales optimiza el proceso de diseño arquitectónico en la reducción de desperdicio de material en la fabricación de piezas CNC • Evaluar en qué medida la generación de algoritmos mediante Grasshopper permite la reducción del tiempo en la fabricación de piezas CNC para la construcción de prototipos WikiHouse • Determinar de qué manera la precisión y eficiencia del diseño facilita el ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse	El uso de las herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python permite optimizar el proceso de diseño arquitectónico en la producción de piezas CNC en la fabricación de prototipos WikiHouse HIPÓTESIS ESPECÍFICAS • ¿El uso de herramientas digitales paramétricas mejora significativamente la precisión y eficiencia en el diseño de piezas CNC? • El uso de herramientas digitales optimiza significativamente el proceso de diseño arquitectónico en la reducción de desperdicio de material en la fabricación de piezas CNC. • La generación de algoritmos mediante Grasshopper permite significativamente la reducción del tiempo en la fabricación de piezas CNC para la construcción de prototipos WikiHouse • La precisión y eficiencia del diseño facilita significativamente el ensamblaje y construcción de prototipos WikiHouse	(Incógnita) Uso de herramientas digitales paramétricas en Grasshopper y Python en el proceso de diseño arquitectónico (y) Producción de piezas CNC	X1 Precisión y eficiencia en el diseño. X2 Generación de algoritmos Año 1 Reducción del tiempo en la fabricación. Año 2 Reducción del desperdicio de material Año 3 Ensamblaje y construcción	1. Capacidad de automatización de modificaciones en el diseño (número de parámetros ajustables) 2. Cantidad de iteraciones necesarias para alcanzar un diseño óptimo (número de versiones) 1. Tiempo de ejecución del algoritmo (segundos/minutos) 2. Reducción de errores 1. Tiempo de mecanizado (minutos por pieza) 2. Cantidad de piezas producidas por hora 1. Cantidad de desperdicio generado (kg) 2. Relación material utilizado vs. material disponible (%) 1. Necesidad de procesos post-mecanizado (lijado, ensamblaje adicional)	Enfoque: Mixto (cualitativo-cuantitativo). Tipo de Investigación: Experimental y aplicada. Diseño de Investigación: Experimental, con comparación entre modelos optimizados y no optimizados. Técnicas: Simulación digital, análisis paramétrico, prototipado, observación estructural, medición de precisión y evaluación de eficiencia. Instrumentos: Software (Grasshopper, Rhino, Python), máquina CNC, fichas de observación, medición de precisión con calibradores, registro de tiempos y desperdicio de material.