

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
SANTIAGO-CHILE



PROTOTIPO DE PANEL PARA VIVIENDA INDUSTRIALIZADA FABRICADO MEDIANTE CARPINTERÍA DE ARMAR ROBOTIZADA

Vicente Ignacio Bulnes Padilla

Memoria de titulación

Para optar a título de Arquitecto

Modalidad I+D

Profesor referente

Francisco Quitral

Profesora correferente

Verónica Arcos

Julio 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Prototipo de panel para vivienda industrializada fabricado mediante carpintería de armar robotizada

Nombre del candidato(a): Vicente Ignacio Bulnes Padilla

Carrera / Grado: Arquitectura

Campus: Santiago, San Joaquín

Departamento: Arquitectura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Francisco Javier Quitral Zapata, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor guía o director de memoria o tesis:

Fecha: 07/09/2026

Digitally signed by Francisco
Quitral

Date: 2026.09.07 13:30:40-03'00'

Firma: Foxit PDF Editor Version: 13.2.4

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/09/2026

Firma: Vicente B

RESUMEN

La presente investigación desarrolla un prototipo de panel para vivienda industrializada fabricado mediante carpintería de armar robotizada, con el objetivo de explorar un sistema constructivo desmontable basado en uniones carpinteras mecanizadas. El trabajo surge frente a la dependencia de fijaciones metálicas y soluciones de difícil reversibilidad presentes en muchos sistemas panelizados de entramado ligero, las cuales pueden limitar la reparación, el reemplazo, el desmontaje y la reutilización de componentes.

La metodología combina revisión normativa, técnica y constructiva con diseño digital, fabricación robotizada y evaluación experimental del prototipo. A partir del análisis de sistemas industrializados en madera, diseño para desmontaje, materialidad y criterios de mecanizado, se desarrolla un panel compuesto por postes, soleras, diagonales y llaves de unión. Sus componentes son modelados digitalmente, mecanizados mediante un brazo robótico industrial y posteriormente ensamblados, desmontados y reensamblados para evaluar la factibilidad constructiva.

Los resultados permiten comprobar la viabilidad geométrica y de montaje inicial del sistema, evidenciando que las uniones carpinteras mecanizadas pueden funcionar como una estrategia constructiva orientada a la reversibilidad del panel. Sin embargo, también se identifican variables críticas asociadas a la madera, como humedad, alabeos, variaciones dimensionales, holguras y desfases de mecanizado, que inciden directamente en el comportamiento del conjunto. Por ello, la investigación se plantea como una validación experimental preliminar, no estructural definitiva, y establece una base para futuras iteraciones, optimización de uniones y ensayos mecánicos.

Palabras clave: Construcción industrializada, diseño para el desmontaje, uniones carpinteras, Carpintería de Armar Robotizada, fabricación digital

ABSTRACT

This research develops a prototype panel for industrialized housing manufactured through robotic timber joinery, with the aim of exploring a demountable construction system based on machined carpentry joints. The study arises from the dependence on metal fasteners and difficult-to-reverse connection systems commonly found in light timber framing panels, which can limit repair, replacement, disassembly, and component reuse.

The methodology combines normative, technical, and constructive review with digital design, robotic fabrication, and experimental evaluation of the prototype. Based on the analysis of industrialized timber systems, design for disassembly, material properties, and machining criteria, a panel composed of posts, plates, diagonals, and timber keys is developed. Its components are digitally modeled, machined using an industrial robotic arm, and subsequently assembled, disassembled, and reassembled to evaluate their constructive feasibility.

The results show the initial geometric and assembly feasibility of the system, demonstrating that machined carpentry joints can operate as a constructive strategy oriented toward panel reversibility. However, critical variables associated with timber were also identified, including moisture content, warping, dimensional variations, joint tolerances, and machining misalignments, all of which directly affected the final behavior of the assembly. Therefore, this research is understood as a preliminary experimental validation, not as a definitive structural verification, and establishes a basis for future iterations, joint optimization, and mechanical testing.

Keywords: Industrialized construction, Design for disassembly, Timber joinery, Robotic timber framing, Digital fabrication.

GLOSARIO

Construcción industrializada:

Modelo de construcción basado en la fabricación controlada de componentes en planta, utilizando procesos estandarizados, repetitivos y coordinados, para posteriormente transportarlos y ensamblarlos en obra. Este enfoque mejora la calidad, reduce tiempos de ejecución y optimiza el uso de recursos.

Entramado ligero (Light Timber Frame):

Sistema estructural compuesto por elementos lineales de madera, como montantes y soleras, que conforman paneles resistentes de bajo peso. Es uno de los sistemas más utilizados en la construcción industrializada de viviendas debido a su facilidad de prefabricación y montaje.

Desmontaje:

Metodología de diseño que considera la posibilidad de desmontar una construcción de forma ordenada, segura y sin dañar sus componentes. Su objetivo es facilitar la reutilización, reparación, mantenimiento y reciclaje de los materiales, promoviendo los principios de la economía circular.

Carpintería de armar robotizada:

Sistema de fabricación que combina los principios tradicionales de la carpintería de armar con tecnologías de fabricación digital y robótica industrial. Consiste en mecanizar uniones carpinteras mediante máquinas CNC o brazos robóticos, logrando alta precisión, repetibilidad y compatibilidad con procesos industrializados.

Sistema panelizado:

Sistema constructivo basado en la fabricación de paneles estructurales o no estructurales que integran diversos elementos del entramado y que son ensamblados posteriormente en obra, permitiendo acelerar la construcción y mejorar el control de calidad.

Escuadría:

Dimensiones transversales de una pieza de madera, expresadas normalmente por su ancho y espesor. La escuadría determina la capacidad estructural, la resistencia al mecanizado y la compatibilidad con distintos tipos de uniones carpinteras.

Riostra:

Elemento estructural dispuesto diagonalmente o de forma estratégica dentro de un entramado para aumentar la rigidez del sistema y resistir esfuerzos laterales, como los producidos por viento o sismos.

Solera:

Elemento horizontal de madera ubicado en la parte inferior o superior de un panel de entramado ligero, cuya función es unir los montantes y transmitir las cargas hacia otros elementos estructurales.

Poste:

Elemento estructural vertical de madera destinado a soportar y transmitir cargas hacia la fundación o hacia otros elementos resistentes. En sistemas de entramado puede corresponder a montantes de mayor sección utilizados en zonas de mayores solicitaciones.

Espiga:

Proyección mecanizada en el extremo de una pieza de madera diseñada para introducirse dentro de una caja u otra cavidad complementaria, formando una unión carpintera capaz de transmitir esfuerzos estructurales.

Caja:

Cavidad mecanizada en una pieza de madera destinada a recibir una espiga u otro elemento de unión. Junto con la espiga conforma una de las uniones tradicionales más utilizadas en carpintería estructural.

Llave de mariposa:

Tipo de unión carpintera caracterizada por una geometría trapezoidal que impide la separación de las piezas en una dirección determinada. Su forma permite transmitir esfuerzos de tracción y flexión sin necesidad de fijaciones metálicas.

Ensamble:

Proceso mediante el cual dos o más componentes estructurales son unidos para conformar un sistema constructivo, utilizando fijaciones mecánicas, uniones carpinteras o ambos, según el diseño del proyecto.

Encaje:

Relación geométrica entre dos o más piezas diseñadas para ajustarse con precisión durante el ensamblaje. Un buen encaje permite transmitir esfuerzos de manera eficiente y mejorar la estabilidad de la unión.

KUKA|prc:

Complemento de programación robótica para Grasshopper desarrollado para controlar brazos robóticos KUKA desde el entorno de modelado paramétrico. Permite simular trayectorias, generar códigos de mecanizado y planificar procesos de fabricación digital antes de ejecutarlos físicamente.

Grasshopper:

Entorno de programación visual integrado en Rhinoceros 3D que permite desarrollar modelos paramétricos mediante algoritmos gráficos. Es ampliamente utilizado en arquitectura, ingeniería y fabricación digital para automatizar procesos de diseño y producción.

TRL 3:

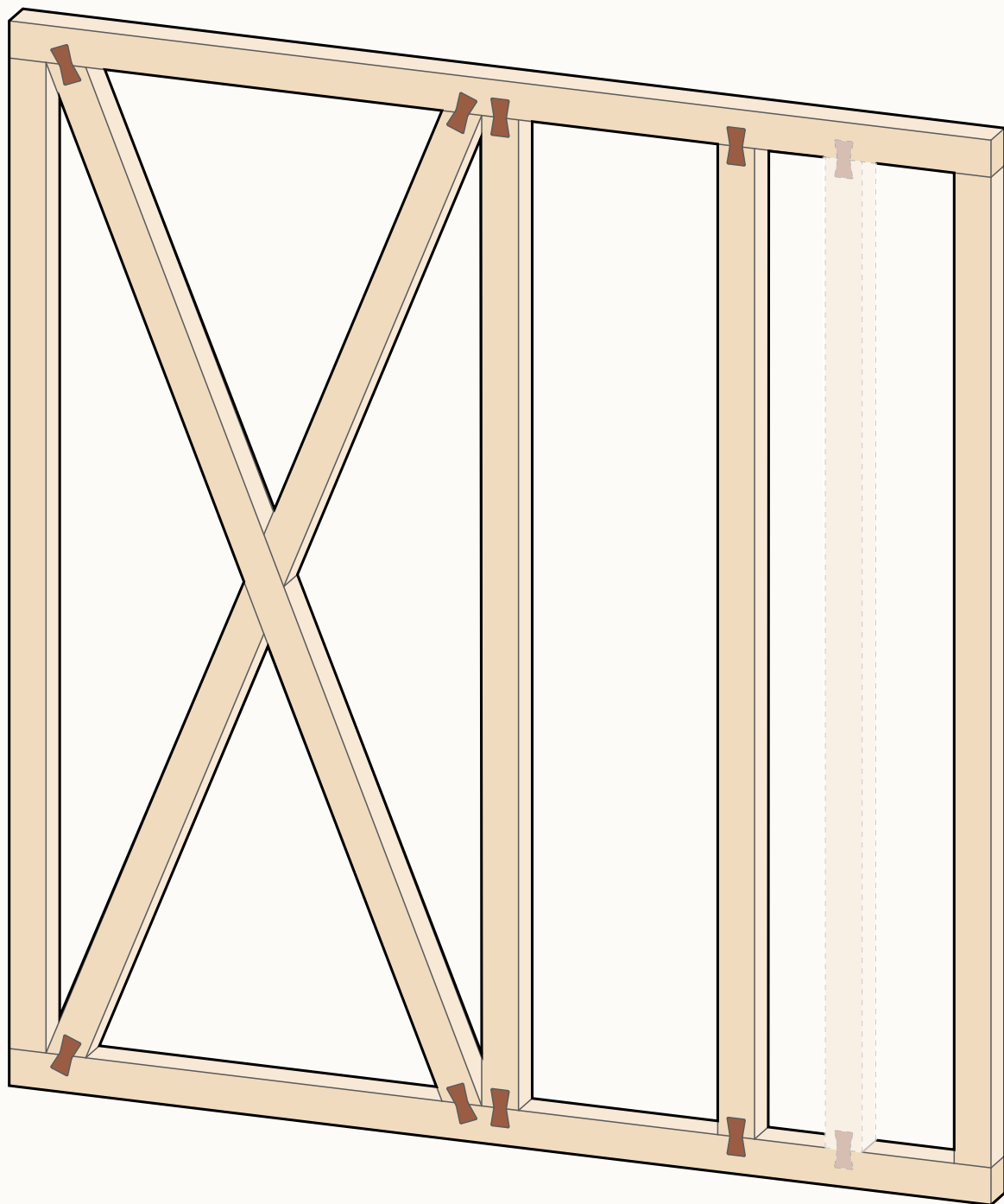
Esta fase incluye la realización de actividades de investigación y desarrollo (I+D) dentro de las cuales se incluye la realización de pruebas analíticas y pruebas a escala en laboratorio orientadas a demostrar la factibilidad técnica de los conceptos tecnológicos. Esta fase implica la validación de los componentes de una tecnología específica, aunque esto no derive en la integración de todos los componentes en un sistema completo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 PROBLEMÁTICA	17
1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA	18
1.3 CAMPO DE APLICACIÓN	19
1.4 ESTADO DEL ARTE	20
1.4.1 Diseño para el desensamble y circularidad	21
1.4.2 Conexiones reversibles, prefabricación y “plug-and-play”	24
1.4.3 Construcción industrializada	27
1.4.4 Carpintería de armar	32
1.5 OBJETIVOS	37
1.5.1 Objetivo general	37
1.5.2 Objetivos específicos	37
1.6 METODOLOGÍA	38
1.7 ALCANCE DE LA PROPUESTA	40
1.8 DEFINICIÓN DE LA MUESTRA	41
2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA	42
2.1 DISEÑO INDUSTRIALIZADO	42
2.1.1 Resolución N° 59	42
2.1.2 Vivienda industrializada Tipo	43
2.1.3 Construcción industrializada	43
2.1.4 Entrevista a empresas de vivienda industrializada	45
2.1.5 Nivel de terminación del panel	47

2.2 SISTEMA CONSTRUCTIVO	48
2.2.1 Sistema constructivo en madera	48
2.2.2 Diseño para el desmontaje	49
2.2.3 Carpintería de armar robotizada	51
2.2.4 Diseño paramétrico	53
2.2.5 Materialidad	55
2.2.6 Definición de la escuadría	55
2.2.7 Diseño arriostrado	57
2.2.8 Dimensiones y elementos	58
2.2.9 Izaje	60
2.2.10 Condición de apilamiento y almacenamiento	61
2.2.11 Transporte	63
2.2.12 Peso y manipulación de los elementos	64
2.3 UNIONES	66
2.3.1 Criterios geométricos del encaje	66
2.3.2 Especie en roble	68
2.3.3 Grados de libertad	69
2.3.4 Unión de llave de mariposa (“Chigiri-tsugi”)	69
2.3.5 Caja y espiga	72
2.4 PRUEBAS A ESCALA 1:10	76
2.4.1 Exploración de tipos de encuentros	76
2.4.2 Encuentro de continuidad	77
2.4.3 Encuentro en T	79
2.4.4 Encuentro en L	79
2.4.5 Desarrollo de tipologías	83
2.5 DESARROLLO DE PRIMER PROTOTIPO A ESCALA	86
2.5.1 Montaje	87
2.5.2 Desmontaje	92

2.5.3 Alzado	92
2.5.4 Errores y desviaciones	93
2.5.5 Aprendizaje para el prototipo final	94
2.6 PRUEBAS DE MECANIZADO	98
2.6.1 Flujo de trabajo	104
2.6.2 Espacio, herramientas y equipo de trabajo	104
2.6.3 Diseño para el mecanizado	108
2.6.4 Primera prueba de mecanizado para la llave	110
2.6.5 Segunda prueba de mecanizado para llave	113
2.6.6 Tercera prueba de mecanizado para llave	116
2.6.7 Mecanizado de Cajas para llave	120
2.6.8 Caja y espiga	124
2.6.9 Media madera	127
2.6.10 Cajas inclinadas	130
2.6.11 Montaje y desmontaje	133
2.6.12 Errores y consideraciones	137
3. CONCLUSIONES	140
4. DISCUSIÓN	142
5. TRABAJOS FUTUROS	144
REFERENCIAS	146
ANEXOS	150



1. INTRODUCCIÓN

En Chile, el déficit habitacional continúa siendo uno de los principales desafíos asociados al acceso a la vivienda. Según el informe Déficit Habitacional Cuantitativo Censo 2024, elaborado por el Centro de Estudios de Ciudad y Territorio del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), el déficit estimado alcanza un total de 491.904 requerimientos de nuevas viviendas, equivalente al 7,5 % de los hogares del país (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2025).

El déficit habitacional sigue siendo un desafío que afecta la calidad de vida de cientos de miles de familias. En respuesta, Chile ha impulsado diversas estrategias, entre ellas la implementación del Plan de Emergencia Habitacional (PEH) 2022-2025, el cual estableció como meta absorber el 40 % de la demanda habitacional estimada mediante la entrega de 260.000 viviendas. Entre las estrategias asociadas a este proceso se encuentra el fomento de la construcción industrializada, entendida como un enfoque constructivo basado en la estandarización, la fabricación off-site y la planificación avanzada de sistemas y componentes en ambientes controlados (Lessing, 2006).

La industrialización comienza así a posicionarse como una alternativa relevante dentro de la política habitacional reciente. De acuerdo con el Informe Nacional y Regional del Plan de Emergencia Habitacional 2022-2025, esta modalidad ha permitido reducir plazos de construcción, mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos, y desarrollar nuevas tipologías de vivienda adaptadas a distintas zonas térmicas. A febrero de 2026, se registraban 2.933 viviendas industrializadas terminadas o entregadas, como parte de un total de 14.613 viviendas industrializadas en distintos niveles de avance, distribuidas en 365 proyectos. Además, el informe identifica 25 empresas industrializadoras certificadas por la División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional del MINVU (DITEC) y 46 Modelos de Vivienda Industrializada Tipo aprobados (MINVU, 2026).

Estos antecedentes muestran que la construcción industrializada no solo responde a la necesidad de aumentar la producción habitacional, sino también a la transformación de los procesos constructivos tradicionales. En esta línea, la Guía de Diseño e Industrialización en Madera plantea que la construcción industrializada permite orientar la industria hacia mayores niveles de productividad y eficiencia mediante la incorporación de Métodos Modernos de Construcción, diseño digital y nuevas metodologías de trabajo. Esta mirada resulta especialmente relevante en el contexto chileno, donde el rubro de la construcción presenta bajos niveles de productividad en comparación con otras áreas productivas, además de importantes desafíos asociados a la generación de residuos, emisiones y retrabajos (CENTRO UC, 2023).

Desde esta perspectiva, la industrialización permite avanzar hacia procesos más controlados, planificados y medibles. En el caso de la construcción en madera, estas condiciones abren la posibilidad de desarrollar sistemas capaces de integrar uniones prefabricadas, reducir la huella de carbono y mejorar en la calidad constructiva. En este marco, la incorporación de herramientas digitales y procesos de fabricación avanzada, como el mecanizado robotizado, permite explorar nuevas formas de producir componentes en madera que respondan tanto a las necesidades habitacionales como a los desafíos de productividad y sostenibilidad del sector.

Sin embargo, la industrialización de la vivienda no solo debe responder a criterios de rapidez y eficiencia productiva, sino también a la capacidad de los sistemas constructivos para adaptarse, desmontarse y reutilizarse a lo largo del tiempo (Torres et al., 2025). En la práctica, muchos sistemas industrializados continúan resolviendo sus encuentros mediante fijaciones metálicas, placas, anclajes, adhesivos o uniones de difícil reversibilidad. Si bien estos recursos permiten asegurar la estabilidad estructural y agilizar los procesos de montaje, también pueden limitar

la recuperación de componentes, dificultando el reemplazo de piezas dañadas, aportando a la acumulación de desechos y reduciendo la posibilidad de modificar o reconfigurar la arquitectura del sistema una vez construido (Torres et al., 2025).

En este sentido, el diseño para desmontaje no debe entenderse únicamente como una estrategia asociada al fin de vida útil de una edificación, sino también como una herramienta proyectual capaz de ampliar sus posibilidades de transformación en el tiempo. La separación, sustitución y reensamblaje de componentes permite concebir sistemas habitacionales más flexibles, adaptables a cambios programáticos, ampliaciones futuras, modificaciones espaciales o nuevas formas de uso. De esta manera, la reversibilidad de las uniones no solo favorece la reutilización material, sino que también permite que el sistema constructivo no quede limitado a una configuración fija y permanente (Roxas et al., 2023).

Bajo esta lógica, el desarrollo de un panel desmontable mediante uniones carpinteras mecanizadas permite explorar tanto el montaje como el desmontaje flexible del sistema, en el que los componentes puedan ser ensamblados y reconfigurados sin comprometer necesariamente la integridad de las piezas. Esto resulta especialmente pertinente en el contexto de la vivienda industrializada, ya que permite compatibilizar la eficiencia de la prefabricación con la posibilidad de variación, crecimiento progresivo y adaptación a distintas condiciones de uso o emplazamiento.

1.1 PROBLEMÁTICA

Diversos estudios recientes han evidenciado que los sistemas panelizados livianos en madera, aun cuando permiten rapidez de montaje y eficiencia constructiva, presentan limitaciones importantes cuando no incorporan criterios de diseño para desmontaje desde su etapa inicial. En particular, el uso predominante de fijaciones no reversibles, como clavos neumáticos, puede dificultar la separación de capas, dañar los componentes estructurales y reducir su potencial de reutilización (Torres et al., 2025).

Más relevante aún es que estas uniones no han sido concebidas para el desensamble, lo que dificulta o imposibilita la separación limpia de los componentes sin generar daños o residuos. Esto limita severamente la posibilidad de reutilizar piezas estructurales, reconfigurar paneles o reincorporar materiales a nuevos ciclos productivos, manteniendo un modelo constructivo esencialmente lineal. En consecuencia, los actuales sistemas industrializados presentan una brecha importante respecto a los objetivos contemporáneos de circularidad, prolongación de vida útil y diseño para el desmontaje.

1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA

Por lo tanto, la propuesta de investigación consiste en desarrollar un prototipo de panel para vivienda industrializada fabricado mediante carpintería de armar robotizada. El sistema se plantea como una alternativa constructiva basada en piezas de madera mecanizadas, donde las uniones entre postes, soleras y diagonales se resuelven principalmente mediante encajes carpinteros, reduciendo la dependencia de fijaciones metálicas convencionales.

La propuesta busca compatibilizar la eficiencia y repetibilidad de la prefabricación con una lógica de montaje, desmontaje y eventual reensamblaje de sus componentes. En este sentido, la incorporación de herramientas de fabricación robotizada permite reinterpretar principios de la carpintería tradicional dentro de un proceso productivo contemporáneo, controlando geometrías, tolerancias y secuencias de unión para explorar nuevas posibilidades en sistemas panelizados de madera.

1.3 CAMPO DE APLICACIÓN

La propuesta se orienta al desarrollo de paneles para edificaciones industrializadas en madera de baja y mediana altura. Entre sus posibles escenarios de aplicación se encuentran la vivienda de emergencia, la vivienda social, campamentos mineros u otras edificaciones con cierto nivel de prefabricación, donde la ligereza del material, la rapidez de montaje y la posibilidad de desmontaje pueden contribuir a optimizar los procesos constructivos. Asimismo, la condición desmontable del sistema permite proyectar estrategias de recuperación, reemplazo o reutilización de componentes al término de su vida útil o frente a futuras modificaciones.

De manera complementaria, la adaptabilidad del sistema podría permitir su integración con otros sistemas constructivos, como estructuras de steel framing, hormigón u obra gruesa convencional, siempre que exista una adecuada coordinación dimensional, estructural y constructiva. En este sentido, la propuesta no se limita necesariamente a una solución aislada en madera, sino que puede entenderse como un componente industrializado capaz de incorporarse en distintos grados de avance de obra, desde etapas de estructura primaria hasta fases posteriores de cerramiento o ampliación.

1.4 ESTADO DEL ARTE

El presente estado del arte aborda los principales avances teóricos, tecnológicos y constructivos vinculados a la industrialización en madera, poniendo especial énfasis en los sistemas basados en entramado ligero o intermedio en madera (Wood framing) y, particularmente, en la carpintería de armar como estrategia para desarrollar sistemas constructivos más eficientes, desmontables y sostenibles (Erman, 2002).

Dentro de este panorama, la madera se consolida como un material estratégico por su condición renovable, su buena relación resistencia–peso, su capacidad de manufactura precisa y su compatibilidad con tecnologías de prefabricación (MINVU & CIM UC, 2024). Entre los sistemas disponibles, destacan diversas aproximaciones que van desde paneles livianos hasta entramados pesados y soluciones masivas como el CLT.

En contraste, la investigación se centra en la posibilidad de industrializar un sistema basado en la carpintería de armar, aprovechando los avances en herramientas digitales, fabricación CNC y robótica para rescatar uniones madera–madera de alto desempeño estructural, con bajo impacto ambiental y con pleno potencial de desensamble. Este enfoque enlaza directamente con los marcos contemporáneos de diseño para el desmontaje y la circularidad, que proponen sistemas reversibles y reutilizables como pilares de la nueva construcción sustentable (Roxas et al., 2023).

A partir de este contexto, el estado del arte se organiza en cuatro ejes temáticos:

- Diseño para el desensamble y circularidad
- Conexiones reversibles, prefabricación y *“plug-and-play”*
- Construcción industrializada
- Carpintería de armar

Esta estructura permite comprender el escenario actual y fundamentar el desarrollo de un panel para vivienda industrializada fabricado mediante Carpintería de armar robotizada,

posicionándolo como una alternativa sostenible frente a los sistemas actualmente predominantes.

1.4.1 Diseño para el desensamblaje y circularidad

El diseño para el desmontaje (DfD) y la circularidad se ha consolidado como un enfoque clave para reducir residuos, prolongar la vida útil de los materiales y facilitar la reutilización de componentes en futuros ciclos constructivos. Este enfoque se encuentra formalizado en la ISO 20887, que establece principios y criterios para evaluar la desmontabilidad y adaptabilidad de edificaciones, considerando niveles que van desde el sistema completo hasta el material individual. Dicha norma enfatiza la importancia de documentar uniones, secuencias de desmontaje, trazabilidad, manuales e inventarios, aspectos esenciales para implementar procesos constructivos verdaderamente circulares (ISO, 2020).

Sin embargo, la incorporación efectiva de estos principios en la construcción en madera presenta desafíos significativos, especialmente en sistemas industrializados de entramado ligero, donde las estrategias de eficiencia productiva suelen estar por encima de los criterios de desmontabilidad.

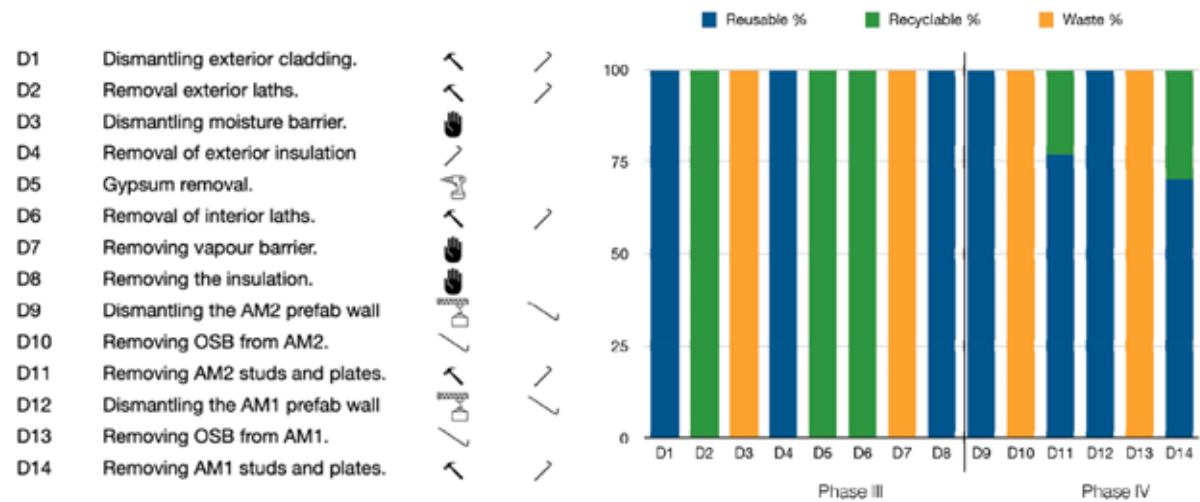


Figura 01. Herramientas requeridas por cada acción. Fuente: Torres et al. (2025)

Figura 02. Niveles de reutilización, reciclaje y pérdidas del material recuperable. Fuente: Torres et al. (2025)

El estudio *Challenges in the Design for Disassembly of Light Timber Framing Panelized Components* constituye una referencia central para comprender las limitaciones del DfD aplicado al entramado ligero. Esta investigación desarrolla el desmontaje real de paneles 2D, registrando las acciones necesarias, herramientas utilizadas, dificultad de ejecución, daños generados y porcentaje de recuperabilidad de los materiales. Los resultados muestran que los paneles evaluados no fueron concebidos desde una lógica de desmontaje, sino desde criterios de rapidez, estandarización y eficiencia en el montaje, lo que reduce considerablemente su circularidad. La elección de capas, adhesivos, fijaciones y secuencia constructiva responde al montaje rápido en obra, no a su recuperación posterior (Torres et al., 2025).

Entre todos los elementos evaluados, el estudio identifica un hallazgo decisivo: el papel de los clavos neumáticos como principal barrera para el desmontaje. Su carácter no reversible genera daño en los montantes, desgarro en revestimientos, deformación de bordes y pérdida de estandarización dimensional. Esto compromete la posibilidad de recuperar o reutilizar las piezas en ciclos posteriores. Aunque algunos conectores como tornillos o pernos permiten un desmontaje más limpio, el sistema dominante presenta un uso intensivo de fijaciones no reversibles que impiden cualquier estrategia circular (Torres et al., 2025).

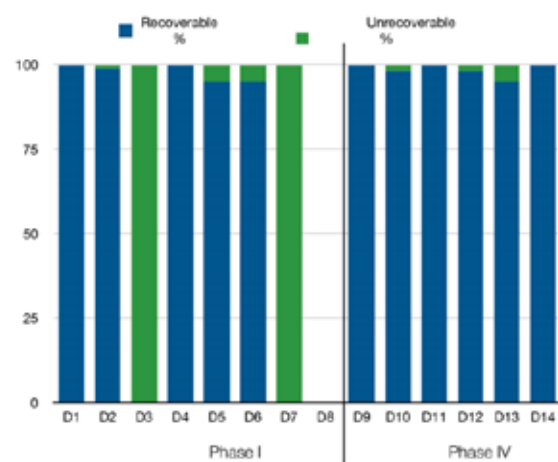


Figura 03. porcentaje de recuperación y pérdida de conexiones por cada etapa de proceso. Fuente: Torres et al. (2025).

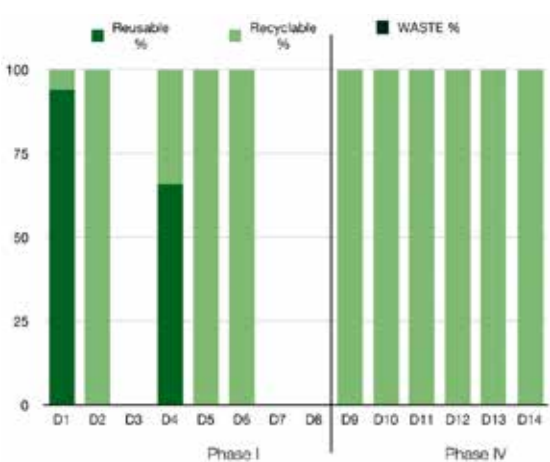


Figura 04. Niveles de reutilización, reciclaje y pérdidas de conexiones. Fuente: Torres et al. (2025).

El estudio concluye que:

- Atraviesan varias capas
- Desgarran recubrimientos
- Deforman bordes
- Hacen imposible separar materiales sin dañarlos
- los tornillos y pernos permiten la separación sin daño, pudiendo considerarse reversibles
- Los adhesivos dificultan el desmontaje y no permiten separación limpia
- Los montantes de madera resultan dañados por la extracción, afectando su reutilización futura
- 94 % de los clavos del revestimiento exterior fueron recuperados, pero no necesariamente reutilizados



Figura 05. Fotografías de los montantes removidos, con claros daños visibles. Fuente: Torres et al. (2025).

1.4.2 Conexiones reversibles, prefabricación y “plug-and-play”

En línea con estos hallazgos, diversos estudios subrayan la necesidad de avanzar hacia conexiones reversibles, especialmente en sistemas panelizados industrializados. La investigación *Performance of reversible timber connections in Australian light timber framed panelised construction* destaca la importancia de desarrollar uniones *plug-and-play* que permitan ensamblajes rápidos y un desmontaje simple, condiciones esenciales para aplicar criterios DfD en la prefabricación. Sin embargo, estos desarrollos se han aplicado principalmente a sistemas de madera maciza (glulam o CLT), con muy poca implementación en entramado ligero, cuya viabilidad de desensamblaje sigue siendo limitada y poco evaluada en la práctica (Yan et al., 2022).

La investigación refuerza esta idea al indicar que la prefabricación, la estandarización y el uso de *dry connections* contribuyen directamente a mejorar la capacidad de desmontaje y reutilización. No obstante, el entramado ligero continúa dependiendo de fijaciones que no cumplen estas condiciones (Tavares et al., 2021).

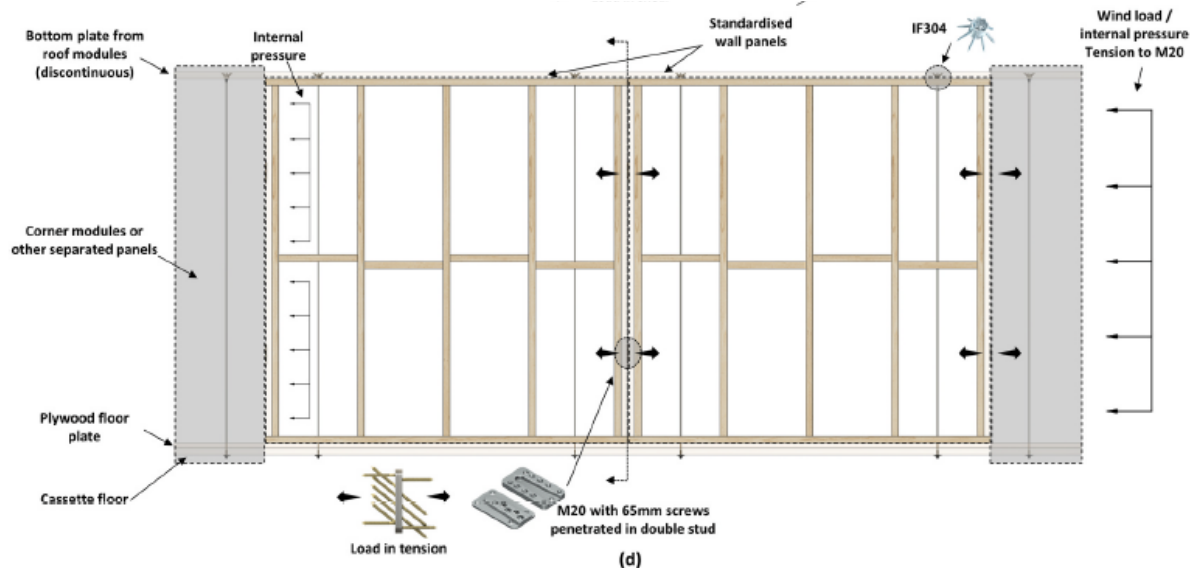


Figura 06. Distintos tipos de conexiones para distintos tipos de escenarios, Fuente: Yan et al. (2022)

Frente a las limitaciones del sistema actual, la literatura sobre uniones carpinteras ofrece una alternativa estructuralmente válida y naturalmente desmontable. El estudio *Demountable Timber Joints for Timber Construction Systems* demuestra que las uniones tradicionales madera-madera poseen un comportamiento reversible, ya que se basan en geometrías intertrabadas que transmiten esfuerzos sin requerir fijaciones metálicas. Además, estas uniones pueden adaptarse a herramientas contemporáneas (Erman, 2002).

Por otro lado, Sandberg, Bulleit y Reid (2000) estudian experimentalmente la resistencia y rigidez de uniones tradicionales tipo caja y espiga fijadas mediante clavijas de roble, demostrando que este tipo de conexión puede analizarse a partir de variables como carga de fluencia, deformación, rigidez y modo de falla. Sus resultados evidencian que la especie de madera utilizada en los elementos de la unión incide en su comportamiento mecánico, lo que permite fundamentar la incorporación de maderas de mayor densidad o dureza en piezas críticas del sistema propuesto.

El estudio señala que en la carpintería tradicional las uniones suelen ser variantes de caja y espiga, retenidas mediante una o más clavijas de madera. También señala que los códigos de edificación modernos no abordaban suficientemente el diseño de estructuras tradicionales conectadas con tarugos de madera, porque estaban más enfocados en entramado ligero o madera pesada con conectores metálicos.

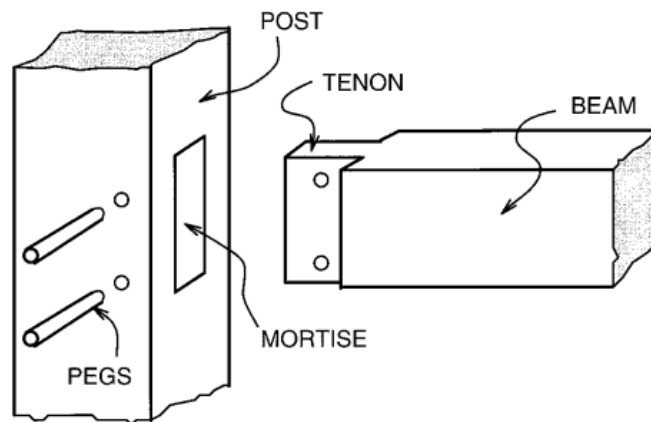


Figura 07. Unión típica de caja y espiga con las clavijas ensayadas. Fuente: Sandberg et al. (2000)

La investigación *Finding the Key: Designing Timber Connections for CLT Panels*, desarrollada por Gabriella Joyce, constituye un antecedente relevante para el estudio de uniones desmontables en madera mediante fabricación digital. El trabajo explora el diseño de sistemas de conexión para paneles CLT a partir de principios de la carpintería japonesa tradicional, reemplazando fijaciones metálicas por llaves de madera mecanizadas digitalmente. A través de un proceso iterativo de diseño, prototipado y evaluación, se desarrollan distintas variaciones geométricas de conectores, como llaves tipo *dovetail*, *star key*, *wedge key* y *arrow key*, con el objetivo de unir paneles, reducir residuos, facilitar el montaje y disminuir la dependencia de elementos metálicos. Esta investigación demuestra cómo la geometría del encaje, la simplicidad formal, las tolerancias de fabricación y la posibilidad de mecanizado robotizado pueden orientar el desarrollo de uniones en madera adaptadas a sistemas constructivos industrializados.

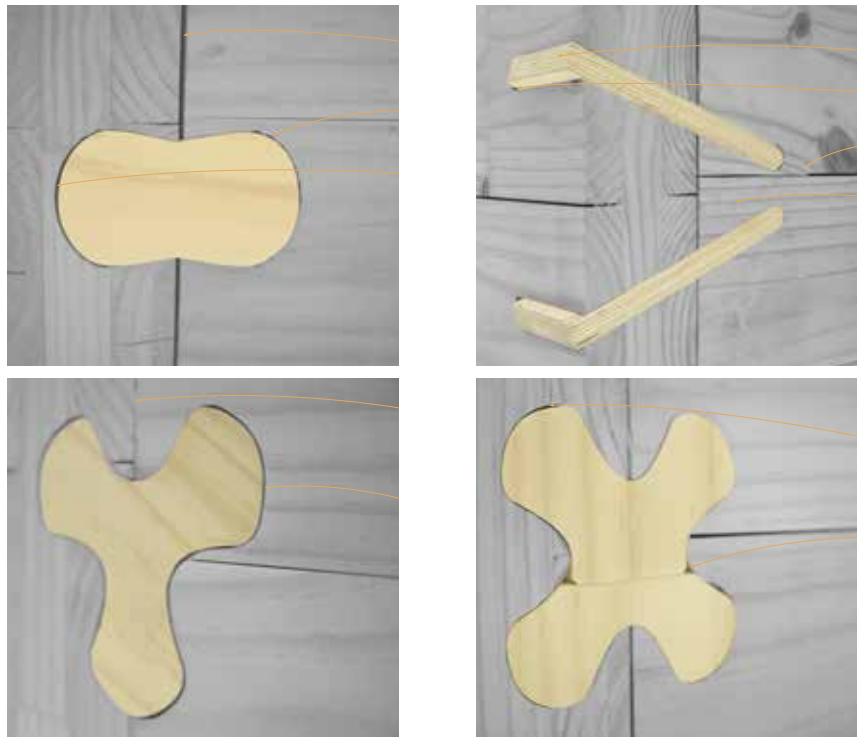


Figura 08. Tipologías de uniones desarrolladas en CLT. Fuente: Finding the Key: Designing Timber Connections for CLT Panels (2019)

1.4.3 Construcción industrializada

Frente a la lentitud, dispersión y variabilidad de los sistemas constructivos convencionales, la industrialización se presenta como una estrategia para aumentar la velocidad de producción, asegurar estándares de calidad y garantizar repetitividad, elementos clave para enfrentar la demanda masiva de soluciones habitacionales. En este marco, autores como Lessing en el estudio *Industrialised House-Building Concept and Processes* plantea que la industrialización no solo busca mejorar la productividad, sino transformar la construcción en un proceso más controlado, replicable y eficiente mediante el uso de prefabricación, estandarización, procesos coordinados y plataformas técnicas, todo lo cual permite reducir errores y asegurar una entrega más rápida y estable de viviendas (Lessing, 2006).

La madera presenta características que la hacen especialmente compatible con la industrialización: ligereza, facilidad de mecanizado y capacidad para ser trabajada con tecnologías CNC y robots industriales. La Guía CIM-UC identifica estas cualidades como claves para consolidar la construcción en madera como sistema industrializado de alto desempeño (MINVU & CIM UC, 2024).

Helmreich et al. (2022) desarrollan una investigación sobre estructuras modulares de madera ensambladas robóticamente mediante uniones tradicionales adaptadas digitalmente. El trabajo parametriza cinco tipologías de unión timber-only, incorporando variaciones geométricas como biseles, chaflanes, cuñas y tarugos para facilitar el ensamblaje robotizado, compensar imprecisiones de posicionamiento y responder a exigencias estructurales contemporáneas. Este antecedente permite situar la presente investigación dentro de una línea de trabajo que recupera principios de la carpintería tradicional, pero los reinterpreta mediante herramientas computacionales y procesos robotizados para el desarrollo de sistemas constructivos industrializados en madera.

Por otro lado, el desarrollo de la construcción industrializada en Chile no depende únicamente de capacidades tecnológicas, sino también de la existencia de marcos técnicos, guías de diseño y normativas que orientan y regulan la adopción de sistemas productivos innovadores. La Guía de Diseño e Industrialización en Madera (MINVU & CIM UC, 2024) establece lineamientos

sobre modulación, dimensiones, tolerancias, coordinación de especialidades, definición de mecanizados, secuencias de montaje, control de calidad en planta y documentación técnica. Por lo tanto el desarrollo de la propuesta debe diseñarse con criterios de documentación, trazabilidad y precisión compatibles con estos requisitos normativos para su futura validación. Entre estas validaciones se encuentra la Resolución 59 Exenta del MINVU (2023), la cual establece el procedimiento oficial para aprobar Viviendas Industrializadas Tipo (VIT) y fija las exigencias que cualquier sistema constructivo industrializado debe cumplir para ser utilizado en los programas habitacionales del Estado. Además, fija el procedimiento para la revisión de proyectos que incorporen esas viviendas bajo los programas habitacionales Fondo Solidario DS N° 49 y Habitabilidad Rural DS N° 10.



Figura 09. Flujo orientado al trabajo con brazos robóticos. Fuente: Helmreich et al. (2022)



Figura 10. Portadas de guías para viviendas industrializadas. Fuente: MINVU y Centro UC, (2023 y 2024)

Para complementar la revisión documental, se realizaron entrevistas exploratorias con profesionales de E2E y EasyWood, dos empresas líderes en prefabricación de viviendas industrializadas en madera. Estas entrevistas permiten establecer un puente entre la teoría, la normativa y la práctica productiva real en Chile. Los hallazgos principales fueron:

- Materialidad: Uso predominante de pino radiata estructural MGP10–MGP14.
- Mecanizados: Mecanizados estandarizados en planta para instalaciones, fijaciones y soleras.
- Panelización: Uso extendido del entramado ligero como sistema industrializado habitual.

- Tolerancias y control: Alta dependencia de tolerancias precisas para evitar ajustes en obra.
- Apertura a innovación: Ambos actores señalan que, si un sistema cumple con precisión, repetibilidad, desempeño estructural y requisitos normativos, puede integrarse a los procesos industrializados actuales.

Como desafíos relevantes:

- La dependencia de conectores metálicos dificulta la desmontabilidad y aumenta la huella ambiental.
- Ausencia de criterios circulares: gran parte de los sistemas no considera DfD desde el diseño (Torres et al., 2025).
- Brechas normativas: pocos estándares explícitos para sistemas innovadores como uniones carpinteras robotizadas.
- Existe una dificultad para conectar paneles cerrados por ambas caras.

La mayoría de estas empresas utiliza sistemas de carpintería ligera, debido a su compatibilidad con procesos de prefabricación, montaje en seco y producción seriada. Este tipo de sistema permite trabajar con elementos livianos, repetibles y fácilmente transportables, lo que facilita la fabricación de paneles en planta y su posterior traslado y montaje en obra.

Además, la carpintería ligera presenta ventajas asociadas a la disponibilidad comercial de sus materiales, la rapidez de ejecución y la posibilidad de coordinar sus componentes mediante modulaciones estandarizadas. Estas condiciones la convierten en una alternativa especialmente pertinente para el desarrollo de viviendas industrializadas, donde la eficiencia productiva, la reducción de tiempos en obra y la repetibilidad de soluciones constructivas resultan fundamentales.

El entramado consiste en piezas lineales (montantes, soleras, vigas, diagonales) que conforman redes estructurales ligeras o robustas según la sección utilizada. Su relevancia para esta investigación se debe a que:

- Permite panelización 2D
- Requiere mecanizados repetibles
- Es compatible con prefabricación off-site
- Puede adaptarse a uniones carpinteras mecanizadas
- Adaptable a flujos paramétricos
- Se puede mecanizar con robots industriales

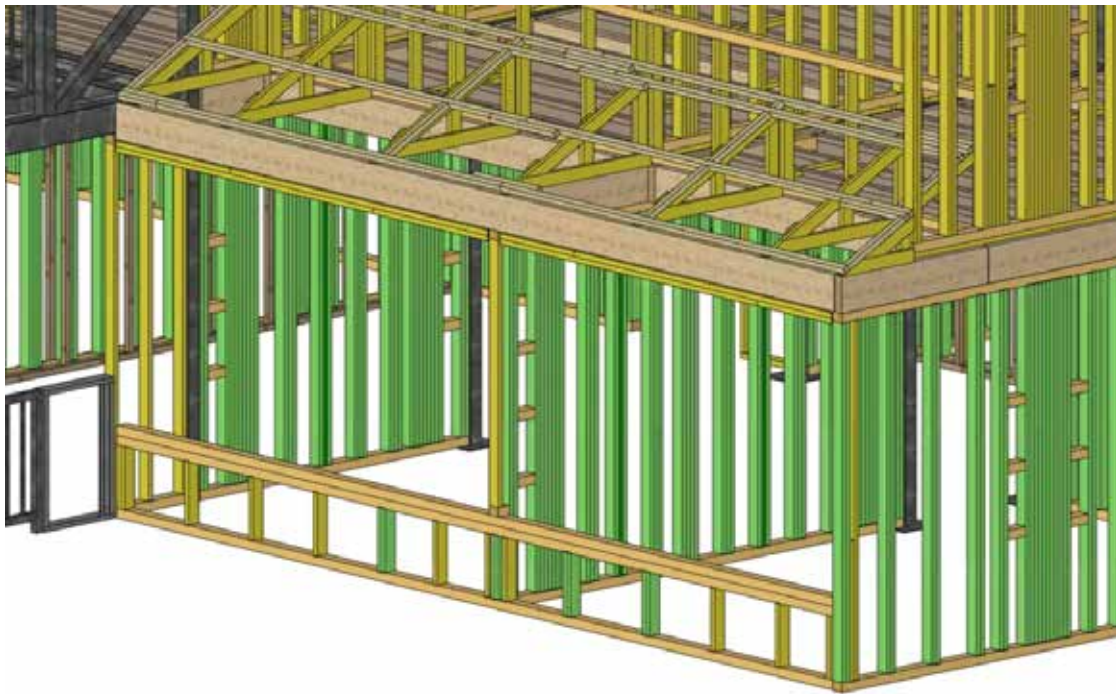


Figura 11. Densidad encontrada en un proyecto de arquitectura de E2E. Fuente: E2E (2025)

1.4.4 Carpintería de armar

En *The Art of Japanese Joinery*, Seike (1977) describe cómo los carpinteros japoneses concibieron uniones capaces de transmitir esfuerzos mediante geometrías cuidadosamente talladas, sin recurrir a clavos o herrajes metálicos. La precisión geométrica, el control de holguras y la interacción entre compresión, fricción y empotramiento constituyen los principios básicos que permiten la estabilidad de sistemas complejos como templos, cubiertas y entramados modulares. Estas uniones se caracterizan por:

- transmitir cargas por superficie
- encajar las piezas de manera complementaria
- proporcionar ductilidad, gracias a la interacción entre madera y geometría
- permitir montaje y desmontaje repetido



Figura 12. Ejemplo de unión, Fuente: *The art of Japanese joinery* (Seike, 1977).

Con el objetivo de sistematizar la carpintería de armar desde una perspectiva moderna, *Demountable Timber Joints for Timber Construction Systems* (Erman, 2002) propone una clasificación funcional que organiza las uniones según su propósito estructural:

- Uniones de compresión (*mortise-tenon, housed tenons*)
- Uniones de tracción (*wedged joints, scarf joints reforzados*)
- Uniones de flexión (*lap joints, dovetails*), capaces de transmitir momentos
- Uniones de geometría variable (*finger joints estructurales, empalmes compuestos*)

Erman destaca que la desmontabilidad es una propiedad inherente de estas tipologías, especialmente cuando la unión se basa en superficies de contacto amplias y en bloqueos geométricos. Su análisis identifica además los modos de falla más comunes: corte de espiga, aplastamiento perpendicular, separación por flexión y propone ajustes contemporáneos que permiten mejorar el desempeño estructural sin perder reversibilidad.

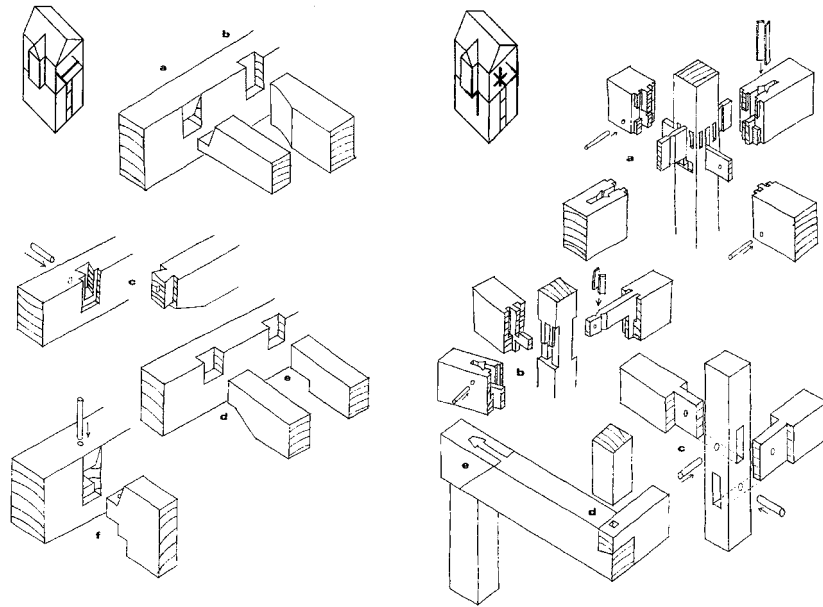


Figura 13. Tipos de uniones según su función mecánica. Erman (2002).

El estudio de Cornejo, Jiménez y Pérez (2024) constituye el aporte más significativo en Chile respecto al comportamiento mecánico de uniones carpinteras en sistemas de entramado. Analizando el ensamble caja–espiga en estructuras patrimoniales de tabique-adobillo, se demuestra que este tipo de unión actúa como:

- Una zona de disipación de energía
- Un mecanismo de conexión flexible capaz de acomodar deformaciones
- Un punto crítico donde se concentra el daño sísmico
- Una geometría que equilibra rigidez y ductilidad

El estudio identifica, además, modos de falla específicos aplastamiento, separación, corte de espiga que deben considerarse al diseñar uniones carpinteras contemporáneas.

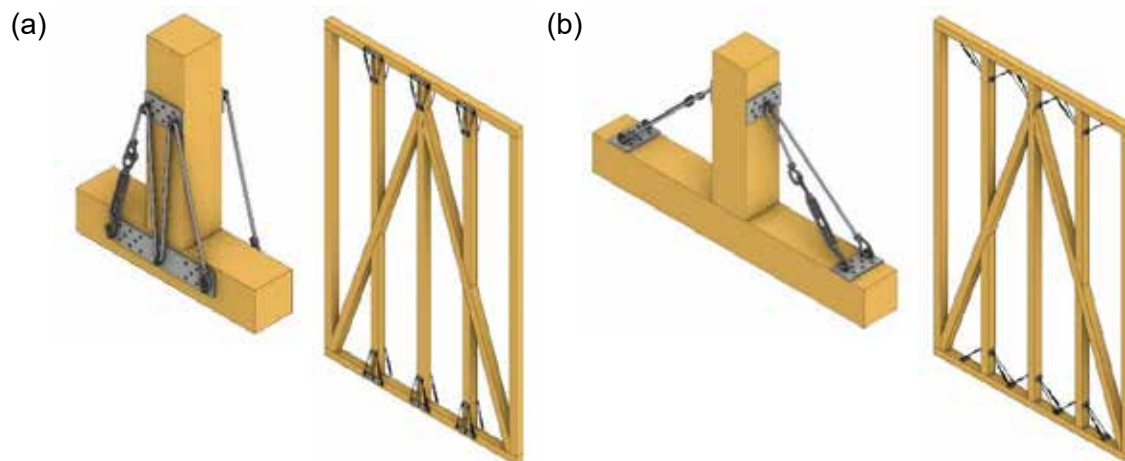


Figura 14. soluciones en acero para muros estructurales de gran sección. Fuente: Cornejo, Jiménez y Pérez (2024).

Por otro lado, los avances en fabricación digital permiten superar la barrera tradicional asociada al trabajo manual de la carpintería. Estudios como *Robotic Assembly of Modular Timber-Only Frame Structures* (Helmreich et al., 2022) y *Workflow for a Timber Joinery Robotics* (Quitral et al., 2020) muestran que la robótica permite:

- Mecanizar encajes complejos con tolerancias del orden de $\pm 0,5$ mm
- Corregir desviaciones naturales de la madera mediante sistemas de medición 3D
- Implementar lógicas de WCS (*Workpiece Coordinate System*) para adaptar la geometría a la pieza real
- Generar uniones repetibles y estandarizables
- Ensamblar elementos sin fijaciones metálicas

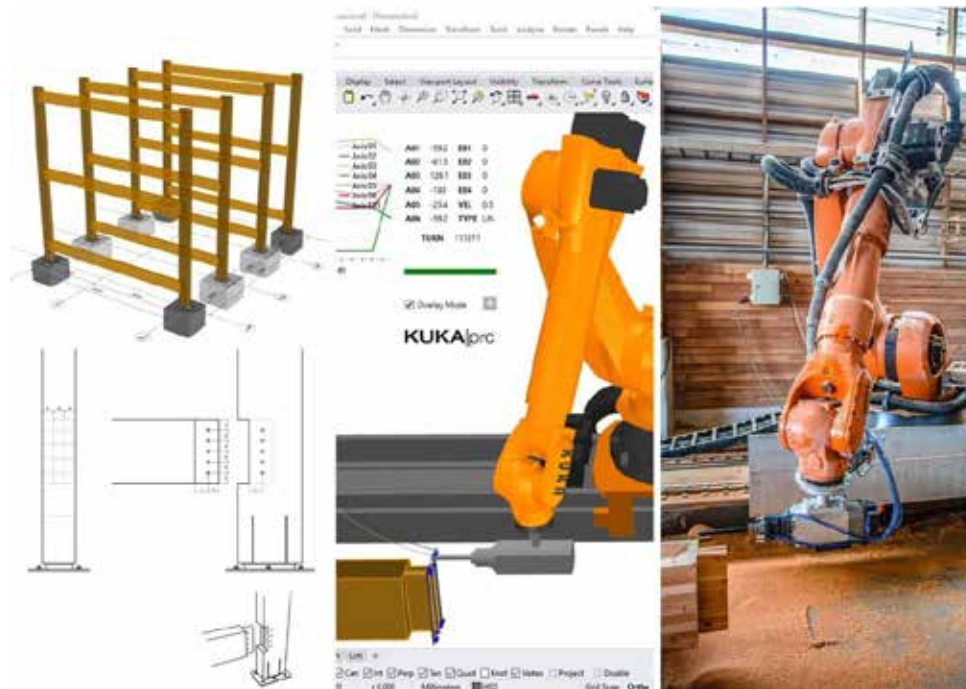


Figura 2: Diseño-Programación-Ejecución de la Carpintería de Armar Robotizada.

Figura 15. Flujos de trabajo con robots en el área de arquitectura. Quitral (2020)

El trabajo de González (2023) agrega que la integración CAD–CAM–robotic permite una traducción directa entre diseño paramétrico y fabricación, lo que posibilita que las uniones carpinteras se incorporen en paneles industrializados con la misma eficiencia que sistemas basados en clavos o placas.

A partir de estas investigaciones se pudo observar que:

- Demuestran la viabilidad real de mecanizar uniones carpinteras complejas mediante CNC y robots industriales.
- Definen flujos digitales de fabricación, donde la unión se genera paramétricamente, se adapta a la pieza real mediante escaneo o medición y luego se ejecuta mediante una herramienta robótica.
- Integran el concepto de WCS para corregir desviaciones, curvaturas o tolerancias en elementos de madera real.
- Confirman que las geometrías interlocking pueden industrializarse, manteniendo desmontabilidad y eficiencia estructural.
- Plantean un modelo escalable en el que las uniones carpinteras pueden incorporarse a paneles 2D de entramado.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de panel fabricado mediante carpintería de armar robotizada, orientado a su escalabilidad en los procesos de construcción industrializada en madera.

1.5.2 Objetivos específicos

- **Analizar** los sistemas actuales de paneles en carpintería ligera aplicados a viviendas industrializadas, considerando requerimientos estructurales, normativos y productivos.
- **Diseñar** un panel que integre uniones carpinteras para procesos de fabricación robotizada, implementando estrategias de programación robótica para el corte, mecanizado y ensamblaje de componentes de madera.
- **Fabricar** y validar la factibilidad técnica (TRL 3) de un prototipo de panel mediante procesos robotizados, evaluando su desempeño en cuanto a precisión, tiempos de producción y eficiencia.

1.6 METODOLOGÍA

ETAPA 1

REVISIÓN DOCUMENTAL

En esta primera etapa, se recopiló y analizó información sobre sistemas de paneles de carpintería ligera aplicados a la vivienda industrializada, junto con la normativa vigente. Asimismo, se realizaron entrevistas a empresas vinculadas a la vivienda industrializada. Esta información permitió establecer criterios de diseño y definir los parámetros técnicos iniciales para el desarrollo del prototipo.

ETAPA 2

DISEÑO DEL PANEL Y LAS UNIONES

Una vez definidos los criterios, se procedió a seleccionar distintos tipos de uniones carpinteras que pudieran adaptarse a procesos robotizados. Estas uniones se modelaron digitalmente mediante softwares como Rhinoceros, Grasshopper y KUKA|prc, con el fin de establecer las tolerancias y trayectorias de mecanizado. En paralelo, se diseñó un panel que integró las uniones seleccionadas.

ETAPA 3

FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se fabricaron prototipos de las uniones seleccionadas en un ambiente controlado, utilizando un brazo robótico de siete grados de libertad. Esta etapa permitió analizar la precisión geométrica de los ensambles, los tiempos de fabricación y montaje, así como la eficiencia en el uso del material. Finalmente, se fabricó un prototipo de panel a escala que integró las uniones previamente optimizadas.

ETAPA 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SÍNTESIS

En la etapa final, se recopilaron y registraron los resultados obtenidos durante la fabricación y evaluación de los prototipos. Se analizaron la precisión geométrica, los tiempos de fabricación y montaje, y el desempeño de los ensambles. Estos resultados permitieron evaluar la factibilidad técnica del prototipo en un nivel TRL 3 y plantear recomendaciones para su futura escalabilidad.

1.7 ALCANCE DE LA PROPUESTA

La presente propuesta de investigación adopta un enfoque exploratorio, descriptivo y proyectual, con el fin de obtener primeras aproximaciones sobre la factibilidad técnica del panel. En este sentido, la metodología articula tanto la revisión de antecedentes normativos y técnicos como la experimentación práctica a través de prototipos, integrando herramientas de diseño digital, simulación y fabricación asistida por robot.

El estudio se concentra en el desarrollo de un panel de muro en madera y, específicamente, en la geometría de sus uniones, su precisión dimensional y sus procesos de fabricación, montaje y desmontaje. En consecuencia, no aborda encuentros como las conexiones con fundaciones, entrepisos y techumbre. Tampoco contempla instalaciones, revestimientos, aislación ni la evaluación de su desempeño térmico, acústico o frente al fuego.

Asimismo, dado que la propuesta se enmarca dentro de los principios de la construcción industrializada, la eficiencia productiva se considera como una variable relevante para orientar el diseño del panel. Sin embargo, la investigación no tiene como objetivo evaluar la viabilidad económica del panel, sino analizar su factibilidad técnica a partir de criterios como precisión dimensional, tiempos de fabricación y montaje, tolerancias, holguras, desmontabilidad y posibilidad de reensamblaje.

Por último, durante el desarrollo de esta memoria se emplean los términos elementos estructurales y panel estructural para referirse, de manera simplificada, a componentes concebidos para cumplir una función resistente dentro del sistema propuesto. Esta denominación describe su intención de diseño y su configuración basada en antecedentes normativos y técnicos, pero no implica que su desempeño estructural haya sido validado mediante cálculos o ensayos.

1.8 DEFINICIÓN DE LA MUESTRA

La muestra de esta investigación es de carácter intencionado y no probabilístico, y está compuesta por prototipos seleccionados según su utilidad para evaluar progresivamente la factibilidad técnica del sistema. Esta comprende:

- Un prototipo preliminar a escala 1:1, fabricado con elementos longitudinales de menor longitud, destinado a comprobar la geometría y el funcionamiento de las uniones.
- Prototipos a escala 1:10, utilizados para explorar distintas tipologías de muro y encuentros entre paneles en continuidad, esquina en “L” y encuentro en “T”.
- Un prototipo final a escala 1:1, destinado a evaluar su fabricación, montaje y desmontaje, además de registrar tiempos, tolerancias, holguras, desviaciones y dificultades del proceso.

2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2.1 DISEÑO INDUSTRIALIZADO

En primer lugar, el desarrollo de la propuesta se inicia con una revisión de antecedentes técnicos, normativos y productivos asociados a la construcción industrializada. Esta etapa permite establecer los criterios base para el diseño del panel, considerando tanto las exigencias normativas aplicables como las condiciones reales de fabricación, montaje y uso de sistemas industrializados.

En paralelo, se revisan antecedentes técnicos asociados a la materialidad del sistema, especialmente en relación con las propiedades de la madera, sus variaciones dimensionales, condiciones de humedad, estabilidad, trabajabilidad y comportamiento frente al mecanizado. Esta información se complementa con antecedentes provenientes de empresas vinculadas a la vivienda industrializada en madera, fichas técnicas, manuales constructivos y referentes de fabricación, con el objetivo de contrastar el diseño propuesto con condiciones productivas reales.

2.1.1 Resolución N° 59

Si bien la construcción industrializada cuenta con una larga trayectoria internacional, en Chile su incorporación reciente a la política habitacional ha sido formalizada mediante instrumentos normativos como la Resolución Exenta N° 59 del MINVU, publicada el 23 de enero de 2023. Esta resolución establece las condiciones y mecanismos de aprobación de proyectos de Viviendas Industrializadas Tipo, así como el procedimiento de revisión para proyectos habitacionales que incorporen este tipo de soluciones en el marco de los programas Fondo Solidario de Elección de Vivienda DS N° 49 y Habitabilidad Rural DS N° 10.

2.1.2 Vivienda industrializada Tipo

La resolución define los Proyectos de Vivienda Industrializada Tipo como aquellos cuyos diseños y obras se desarrollan aplicando estándares de industrialización, donde al menos el 50 % de los componentes y elementos que conforman la vivienda son desarrollados en fábrica de manera industrializada. Estos componentes pueden corresponder a elementos verticales y horizontales, estructurales y no estructurales, tales como techumbres, pisos, entrepisos, losas, tabiques y muros, integrando además terminaciones y especialidades sanitarias y eléctricas. Todo ello se organiza bajo una secuencia de fabricación, traslado y montaje, coordinada desde la etapa de diseño por las empresas industrializadoras.

La resolución además establece exigencias asociadas a trazabilidad, control de calidad, fiscalización en planta, montaje, manipulación, conexiones y documentación técnica del sistema.

2.1.3 Construcción industrializada

La construcción industrializada se define como una forma de ejecutar obras mediante procesos integrados de diseño, fabricación y montaje, generalmente desarrollados en

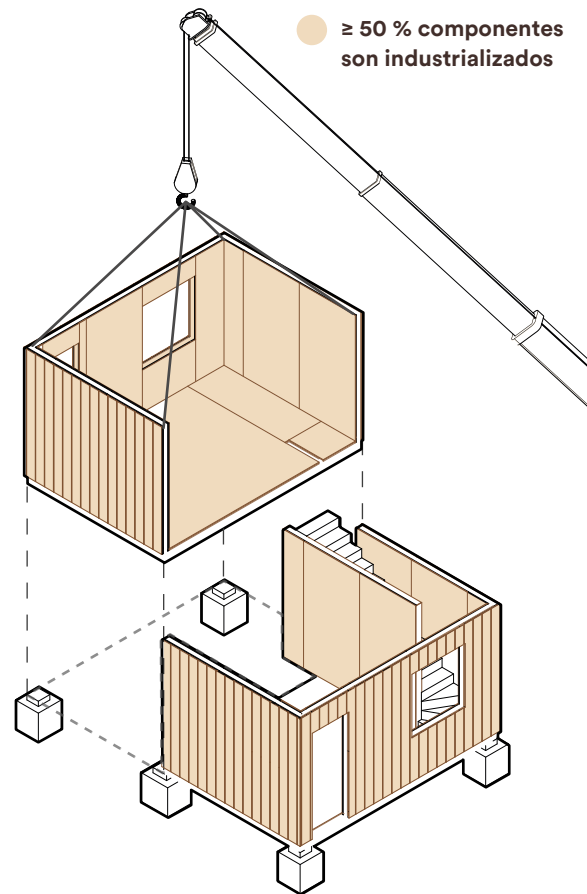


Figura 16. Isométrica de porcentaje de componentes industrializados. Elaboración propia

planta o fábrica, donde uno o varios elementos constructivos son producidos bajo condiciones controladas para conformar parte o la totalidad de una edificación. De acuerdo con la Resolución Exenta N° 59, este enfoque busca acelerar la construcción en terreno, mejorar los controles de calidad y trasladar a la obra principalmente actividades de ensamblaje y terminación.

Desde esta perspectiva, la construcción industrializada no debe entenderse únicamente como prefabricación, sino como una organización sistémica del proceso constructivo, basada en procedimientos seriados, repetitivos, rítmicos y estandarizados. Esta organización puede desarrollarse en sitio, en fábrica o mediante procesos automatizados y robotizados, incorporando distintos grados de prefabricación según el tipo de sistema utilizado (MINVU & CIM UC., 2024).

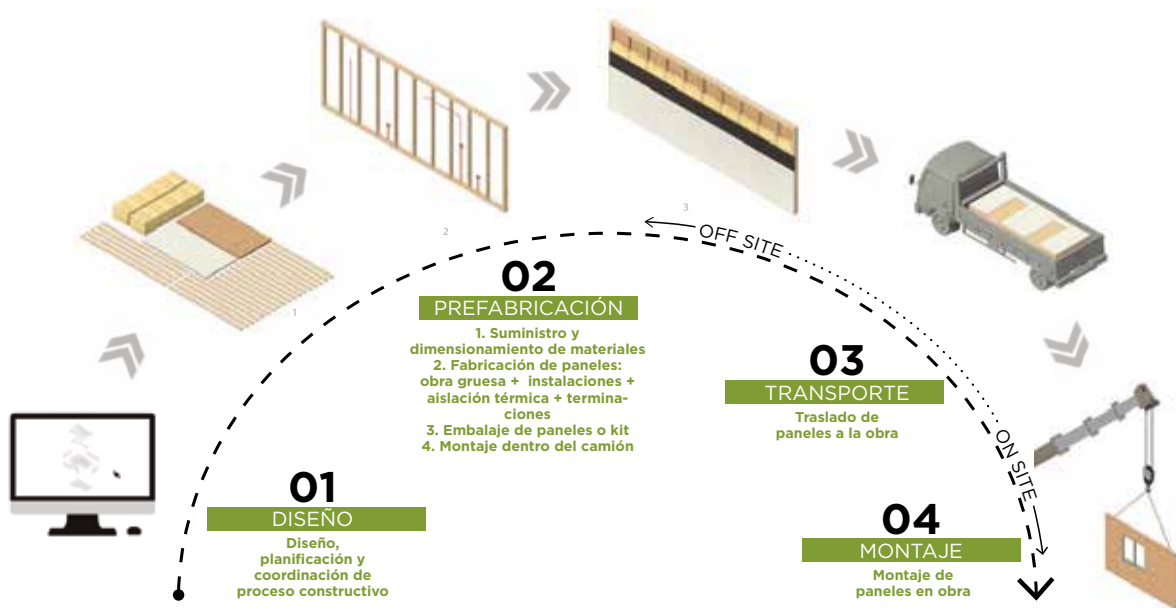


Figura 17. Etapas del proceso constructivo industrializado. Fuente: Soluciones constructivas para la industrialización, Centro UC (2023)

2.1.4 Entrevista a empresas de vivienda industrializada

Con el fin de comprender las dinámicas actuales de la industria de la vivienda industrializada en madera, durante el desarrollo de esta investigación se realizaron entrevistas a profesionales pertenecientes a las empresas E2E y Easywood. Estas instancias permitieron conocer de primera fuente los criterios de diseño arquitectónico y estructural utilizados por ambas organizaciones, así como los procesos de fabricación, montaje y coordinación que intervienen en el desarrollo de sus sistemas constructivos.

Las entrevistas permitieron identificar requerimientos, limitaciones y oportunidades asociadas a la fabricación industrializada de componentes en madera. Aspectos como las escuadrías utilizadas, los sistemas de unión, las tolerancias de fabricación, los criterios de transporte y montaje, y las exigencias estructurales de los paneles fueron considerados como antecedentes relevantes para orientar las decisiones de diseño adoptadas durante el desarrollo de la propuesta.

La información recopilada no tuvo como objetivo replicar los sistemas empleados por estas empresas, sino comprender las

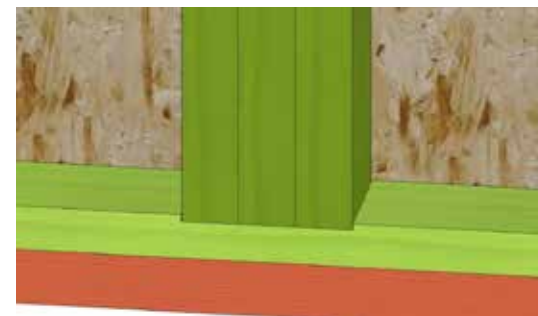
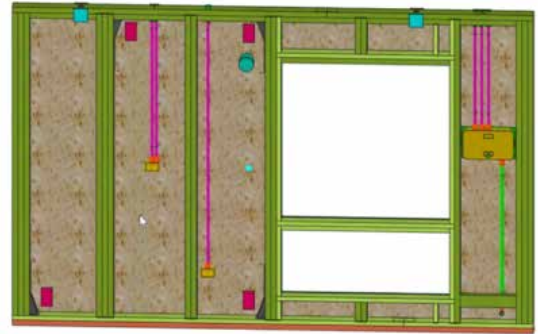


Figura 18. Conformación estructural de paneles de proyectos de E2E. Fuente: E2E (2025)

condiciones reales bajo las cuales se desarrollan actualmente las viviendas industrializadas en madera. De esta manera, las entrevistas sirvieron como una referencia práctica para contrastar la propuesta desarrollada con los requerimientos y desafíos presentes en el sector.

Además, los profesionales del área señalaron que algunos sistemas actuales ya cuentan con una línea de estrategias desmontables como pueden ser los módulos o tabiques de ampliación. Estos elementos suelen estar pensados para permitir el crecimiento futuro de la vivienda, respondiendo a cambios en los requerimientos familiares o programáticos. Sin embargo, estas soluciones no necesariamente implican que la totalidad del sistema constructivo haya sido concebida bajo criterios de desmontabilidad, reutilización o reconfiguración integral, por lo que se evidencia una oportunidad para profundizar en sistemas donde la desmontabilidad no se limite únicamente a la ampliación, si no que a todo el ciclo de vida útil de un elemento.

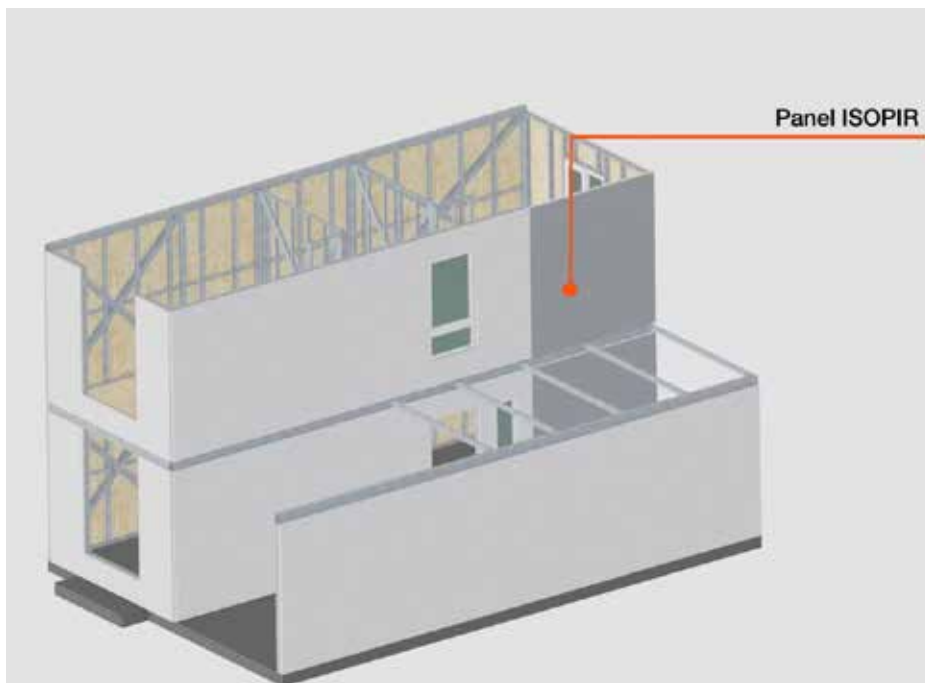


Figura 19. Panel destinado a ser desmontado para una futura ampliación. Fuente: Casa VITA (CINTAC, 2023)

2.1.5 Nivel de terminación del panel

La Guía de diseño e Industrialización en madera establece tres niveles de terminación posibles para el panel: panel en obra gruesa, compuesto únicamente por la estructura principal, panel semiterminado, que incorpora instalaciones y componentes complementarios, y panel terminado, que integra aislación, revestimientos, terminaciones y otras capas constructivas.

Para esta investigación se selecciona el nivel 1, correspondiente al panel en obra gruesa, dado que el estudio se concentra en evaluar la factibilidad geométrica y constructiva del sistema. En consecuencia, se excluye el mecanizado destinado a la incorporación de instalaciones, puesto que corresponde a una operación previamente abordada en sistemas industrializados y no constituye una variable crítica para los objetivos de esta investigación.

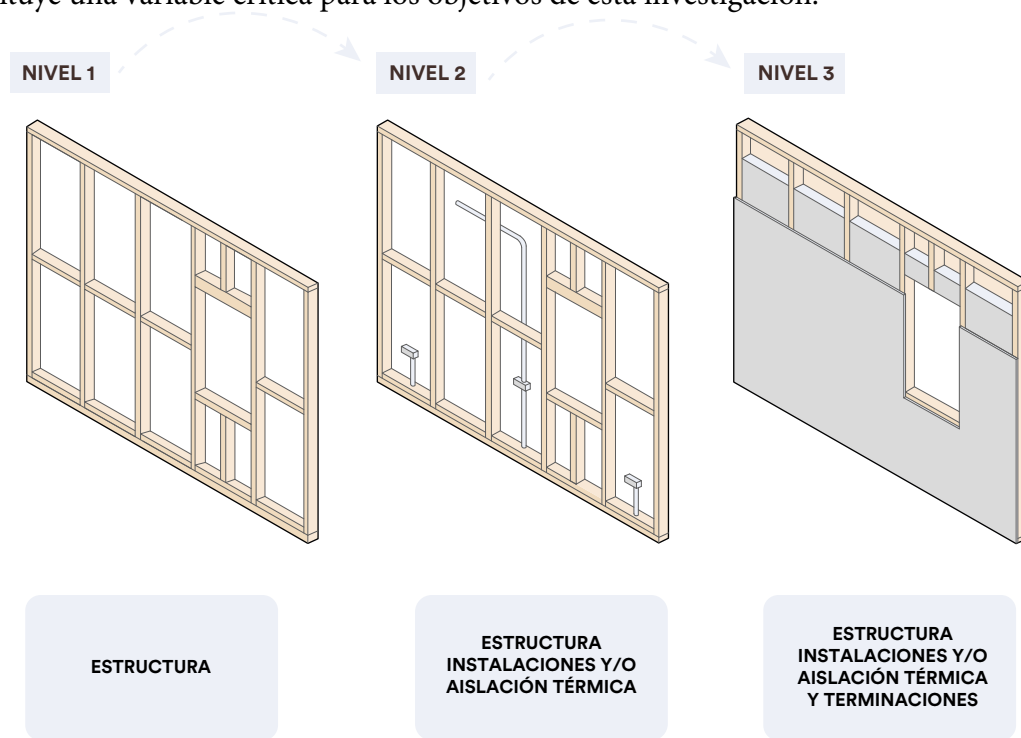


Figura 20. Clasificación de paneles prefabricados, diagrama elaborado a partir de Guía de diseño e industrialización en madera, 2024

2.2 SISTEMA CONSTRUCTIVO

2.2.1 Sistema constructivo en madera

Actualmente, la construcción industrializada en madera puede desarrollarse a partir de distintos sistemas constructivos, entre los que destacan tanto soluciones de madera masiva, como CLT y madera laminada encolada, como sistemas de entramado ligero, dentro de los cuales se encuentra el marco plataforma. Cada uno de estos sistemas presenta condiciones productivas, estructurales y constructivas distintas, especialmente en relación con su grado de prefabricación, posibilidades de modulación, repetibilidad y capacidad de estandarización.

En el caso de los sistemas de madera masiva, las mayores secciones y superficies disponibles permiten alojar uniones de mayor complejidad geométrica, facilitando el desarrollo de encajes mecanizados entre elementos. Por esta razón, muchas investigaciones sobre uniones carpinteras contemporáneas y fabricación digital se han desarrollado en torno a sistemas como CLT o glulam, donde la masa del material permite trabajar con mayores profundidades de mecanizado y con conexiones de mayor escala.

Sin embargo, para el desarrollo de vivienda industrializada de baja y mediana altura, los sistemas de entramado ligero mantienen una alta pertinencia debido a su repetibilidad, modulación y capacidad de organizarse mediante elementos bidimensionales, como paneles de muro, piso o cubierta. Dentro de estos sistemas, el marco plataforma constituye una de las soluciones más extendidas en construcción en madera, ya que facilita la fabricación y montaje de sistemas panelizados 2D y módulos 3D (Banco Mundial, 2020).

En este contexto, la presente investigación toma como referencia el sistema de marco plataforma, no con el objetivo de reproducirlo de manera convencional, sino para reinterpretar algunos de sus principios constructivos mediante uniones carpinteras mecanizadas. Esta decisión permite situar el prototipo dentro de una lógica cercana a la vivienda industrializada en madera, pero explorando una alternativa de ensamblaje que reduzca la dependencia de fijaciones metálicas y favorezca procesos de montaje, desmontaje y reensamblaje.

A modo de respaldo, el estudio del prototipo se apoya en tres guías y manuales técnicos vinculados al diseño, construcción e industrialización en madera. Estos documentos permiten establecer criterios generales sobre sistemas constructivos en madera, panelización, coordinación dimensional, industrialización, desempeño técnico y diseño estructural, los cuales sirven como base para orientar el desarrollo del prototipo

- Soluciones constructivas para la industrialización (Centro UC 2023)
- Guía de diseño e industrialización en madera (Centro UC y MINVU 2024)
- Manual de diseño de estructuras en madera, (Centro UC 2021)

2.2.2 Diseño para el desmontaje

El diseño para el desmontaje, o Design for Disassembly (DfD), corresponde a una estrategia proyectual orientada a facilitar la separación, recuperación y reutilización de componentes constructivos al término de su vida útil o frente a futuras modificaciones de una edificación. A diferencia de un modelo lineal de construcción, uso y demolición, el DfD propone anticipar desde la etapa de diseño cómo los elementos serán desmontados, clasificados, transportados, reparados o reincorporados a nuevos ciclos de uso.

Esta aproximación resulta especialmente relevante frente a la generación de residuos de construcción y demolición, los cuales suelen terminar en vertederos o procesos de disposición final con bajo nivel de valorización. En este contexto, la transición hacia modelos circulares exige no solo reducir residuos durante la etapa de construcción, sino también diseñar sistemas capaces de conservar el valor material y funcional de sus componentes una vez terminada su primera vida útil. La industrialización presenta condiciones favorables para este propósito, ya que trabaja con componentes repetibles, documentados, trazables y fabricados bajo mayores niveles de control, lo que puede facilitar su recuperación y reutilización.

En el caso de la construcción en madera en Chile, esta discusión adquiere una condición particular. Debido a las exigencias de protección e impregnación para usos constructivos, asociadas a la OGUC y a la NCh819, la madera estructural impregnada no puede ser parte de

un proceso de reciclaje.

De acuerdo con Guy y Ciarimboli, un proyecto que considera estrategias de diseño para desmontaje reducirá las implicaciones de costos de cambios en el proceso de diseño, al aumentar la simplificación de los sistemas y disminuir su interdependencia física.

El desmontaje de estructuras requiere la implementación de estrategias simples de demolición, que impidan cruces en el flujo de residuos y se pierdan los beneficios de la reutilización, por lo tanto, es importante plantearlo desde el inicio de un proyecto y todas las estrategias de diseño consideren este aspecto.

La Guía de diseño e industrialización en madera define principios generales para orientar el diseño para desmontaje. Entre ellos se encuentran la documentación de materiales y métodos de desmontaje, la selección de materiales con potencial de reutilización, el diseño de conexiones

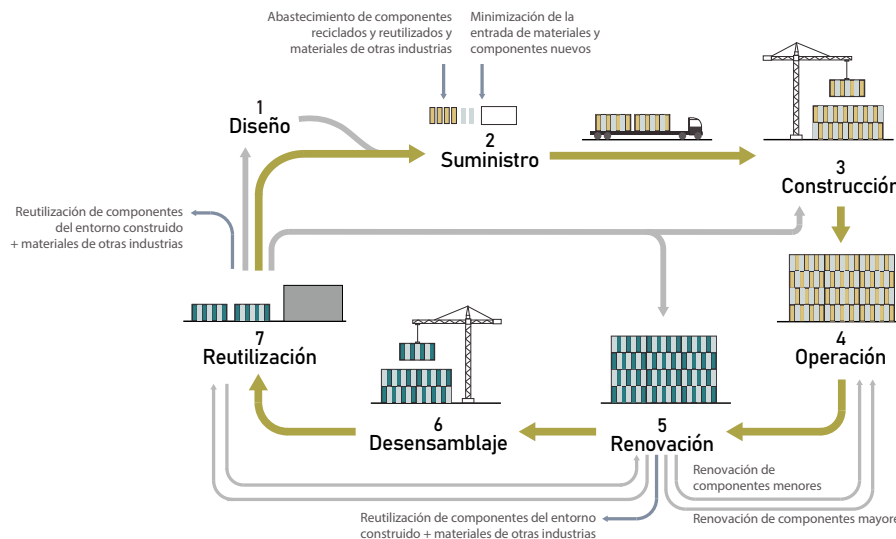


Figura 21. Aplicación de los principios de la economía circular. Fuente: Guía de diseño e industrialización en madera, (2024)

accesibles, la reducción de uniones químicas o adhesivas, la separación de sistemas mecánicos, eléctricos y sanitarios, la simplicidad estructural y formal, la interoperabilidad entre componentes y la seguridad durante el proceso de desmontaje. Estos criterios permiten comprender que el desmontaje no depende únicamente del tipo de unión utilizada, sino de la coordinación integral entre materialidad, diseño, fabricación, montaje y documentación técnica.

Para que el desmontaje conserve efectivamente los beneficios de la reutilización, es necesario que el proceso sea planificado desde el inicio del proyecto. De lo contrario, la separación de componentes puede transformarse en una demolición parcial, generando daños, contaminación cruzada de materiales o pérdida de valor de los elementos recuperados. Por esta razón, las estrategias de desmontaje deben considerar tanto la accesibilidad de las uniones como la secuencia de armado y desarmado, la manipulación de los componentes, la identificación de piezas y la posibilidad de reensamblaje.

Desde esta perspectiva, la presente investigación incorpora el diseño para desmontaje como un criterio central en el desarrollo del panel. El uso de uniones carpinteras mecanizadas busca reducir la dependencia de conexiones metálicas o adhesivas de difícil separación, permitiendo que los componentes puedan ensamblarse, desmontarse y eventualmente reutilizarse sin recurrir a procesos destructivos.

2.2.3 Carpintería de armar robotizada

Históricamente, muchas uniones carpinteras tradicionales han sido desarrolladas mediante procesos manuales. Si bien estas técnicas permiten alcanzar un alto nivel de detalle y resolución constructiva, su aplicación directa presenta limitaciones cuando se busca responder a las exigencias de eficiencia, repetibilidad y producción propias de la construcción industrializada.

En este contexto, la incorporación de maquinaria de control numérico, brazos robóticos y herramientas de fabricación digital permite reconsiderar el potencial de las uniones carpinteras dentro de sistemas constructivos contemporáneos. A diferencia del trabajo manual, estos procesos permiten ejecutar geometrías complejas con mayor control dimensional, repetir operaciones de manera sistemática y adaptar las trayectorias de mecanizado a variaciones

paramétricas del diseño. Esta capacidad resulta especialmente relevante en la fabricación de paneles o piezas en serie, donde la precisión, la coordinación entre componentes y la reducción de tiempos de producción constituyen variables fundamentales.

Para efectos de esta investigación, la fabricación de elementos en madera asistida por robot se define como carpintería de armar robotizada, entendida como un proceso de diseño y fabricación de elementos de madera mediante ensambles carpinteros tradicionales o reinterpretados, cuya geometría es desarrollada digitalmente y mecanizada mediante herramientas de fabricación asistida por robot. Esta aproximación permite trasladar principios propios de la carpintería de armar, como el encaje, la reversibilidad y la transmisión de esfuerzos a través de la geometría de las piezas, hacia un contexto de producción industrializada, donde la precisión dimensional, la repetibilidad y la posibilidad de personalización paramétrica juegan el rol principal (definición hecha a partir de antecedentes Madera 21, carpintería de armar robotizada, 2022).



Figura 22. Ejemplo de carpintería de armar robotizada. Fuente: Mylodon Robotics SpA, 2022

2.2.4 Diseño paramétrico

El diseño paramétrico se aplica principalmente al desarrollo de las uniones carpinteras, permitiendo que estas no se entiendan como geometrías fijas, sino como soluciones ajustables a distintas secciones, profundidades, tolerancias y condiciones de encuentro entre elementos. De esta manera, una misma lógica de unión puede adaptarse sin necesidad de redibujar manualmente cada variante, manteniendo criterios comunes de ensamblaje, desmontaje y transmisión de esfuerzos.

Para controlar estas variaciones se trabajó en Grasshopper, donde se definieron los parámetros geométricos de cada unión y las relaciones entre sus componentes. Este entorno permitió modificar dimensiones, posiciones, ángulos, radios y holguras, además de verificar la correspondencia entre las piezas receptoras y los elementos de encaje antes de su fabricación.

La definición paramétrica también facilitó la integración entre diseño y mecanizado robotizado, ya que las geometrías generadas podían vincularse con la ubicación de cortes, las trayectorias de herramienta y las tolerancias requeridas para el ensamblaje. Así, los ajustes realizados en el modelo digital podían transferirse de manera más directa al proceso productivo, reduciendo errores de coordinación y favoreciendo la repetibilidad de las uniones.

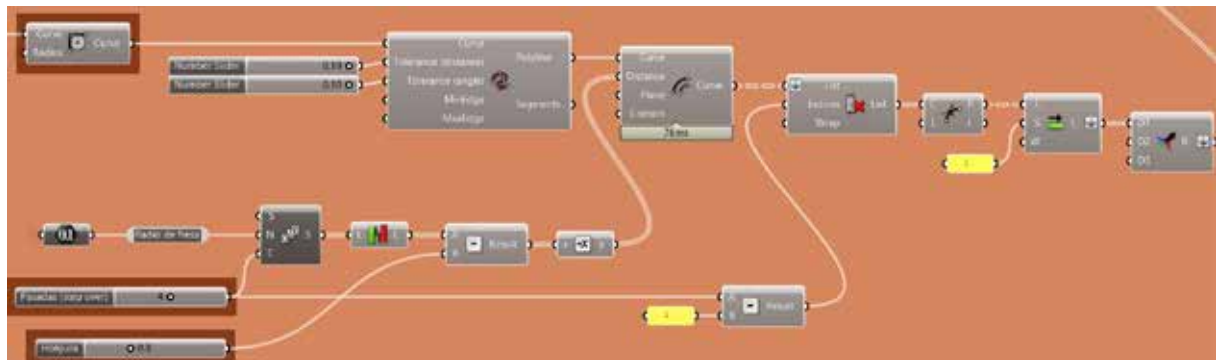


Figura 23. Definición paramétrica general para el desbaste de las piezas en Grasshopper. Elaboración propia

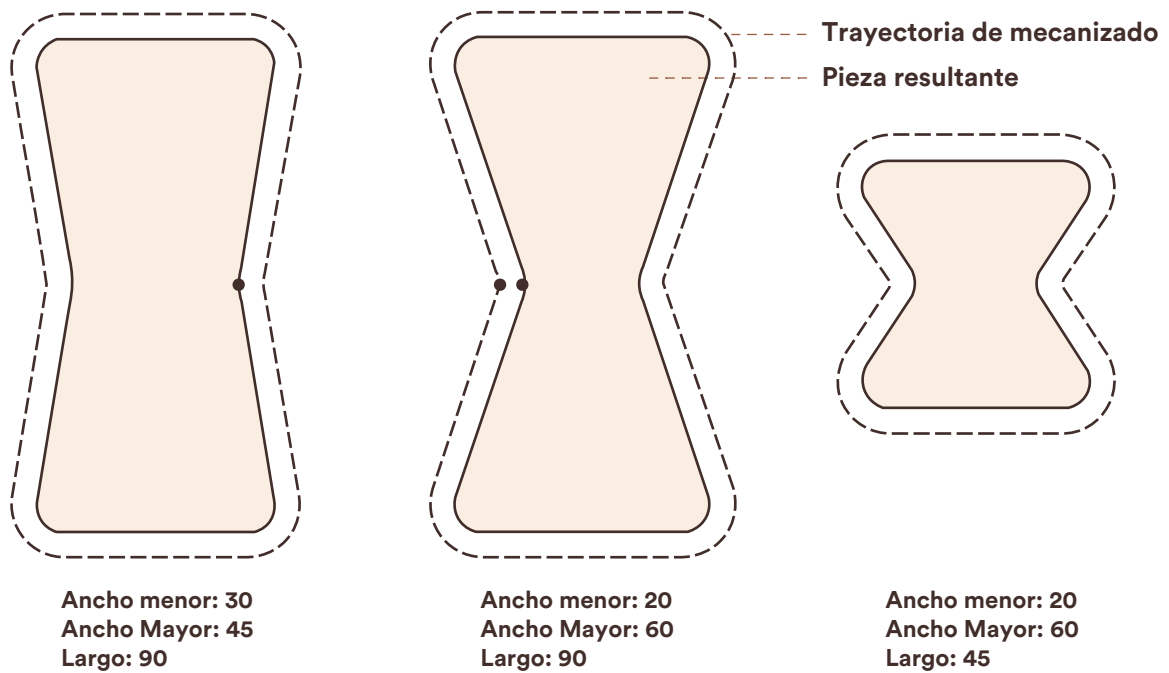
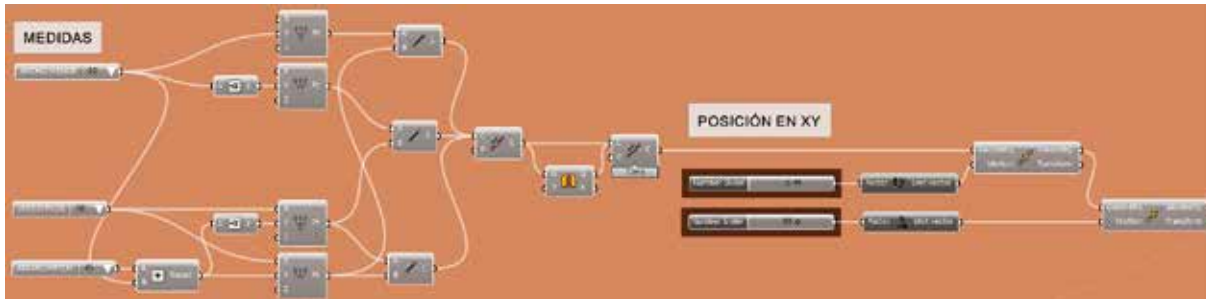


Figura 25. Adaptación paramétrica hecha para las piezas de unión. Elaboración propia

2.2.5 Materialidad

A partir de la revisión de empresas vinculadas a la vivienda industrializada en madera y de antecedentes normativos nacionales, como la NCh1198 y la NCh1970, se identifica que una de las especies más utilizadas en sistemas estructurales de entramado ligero corresponde al pino radiata seco, cepillado e impregnado, del tipo MGP 10 al 14. Este material se emplea habitualmente como madera aserrada estructural, clasificada visual o mecánicamente según los requerimientos del proyecto y las solicitudes definidas por cálculo.

La clasificación visual considera la presencia, ubicación y tamaño de defectos como nudos, médula, aristas faltantes, grietas, alabeos, curvaturas o desviaciones de fibra, los cuales pueden afectar el comportamiento resistente de la pieza. Por otro lado, la clasificación mecánica permite asignar grados estructurales a partir de propiedades medidas mediante ensayos o equipos especializados, como rigidez o resistencia estimada.

Para efectos de esta investigación, resulta especialmente relevante trabajar con madera cepillada o dimensionada, ya que la regularidad de la sección incide directamente en la precisión del mecanizado y en el calce de las uniones.

2.2.6 Definición de la escuadría

En los sistemas de entramado ligero, el uso de piezas de 2×4 " se encuentra ampliamente extendido debido a su disponibilidad comercial, facilidad de manipulación, compatibilidad con procesos de montaje repetitivos y adecuación a sistemas de panelización en madera. Por ello, En sistemas de paneles industrializados se ha observado que, en algunos proyectos de arquitectura, los montantes o pies derechos tienden a duplicarse o triplicarse para responder a mayores solicitudes o resolver encuentros entre paneles o conformar bordes de vanos.

Por otro lado, en la literatura de carpintería estructural tradicional es posible reconocer criterios mínimos de sección y proporciones para el desarrollo de encajes en madera, los cuales buscan mantener una relación adecuada entre el volumen mecanizado y la sección remanente del elemento. Esta consideración resulta especialmente importante en un sistema donde la propia

madera debe asumir la transmisión de esfuerzos a través de la geometría del encaje y del contacto entre superficies.

A partir de estas consideraciones, se plantea la oportunidad de diseñar con una escuadría de mayor sección, capaz de responder simultáneamente a requerimientos estructurales y constructivos. Por un lado, permite disponer de mayor material remanente luego del mecanizado y por otro, facilita el desarrollo de uniones más profundas, legibles y repetibles.

Por otro lado, a partir de lo conversado con proveedores de madera como Añihue, se observó que los costos asociados a la producción de elementos de mayor sección se relacionan principalmente con el volumen total de madera producida, medido en metros cúbicos, más que con la dimensión específica de cada pieza en bajas escalas de producción. De este modo, el uso de elementos de mayor escuadría no necesariamente implica un aumento significativo del costo frente a piezas comúnmente utilizadas, como 2×4 ” o 2×6 ”. No obstante, esta observación debe entenderse como un antecedente preliminar, ya que la viabilidad económica de una propuesta constructiva basada en escuadrías mayores requeriría una evaluación específica a mayor escala.

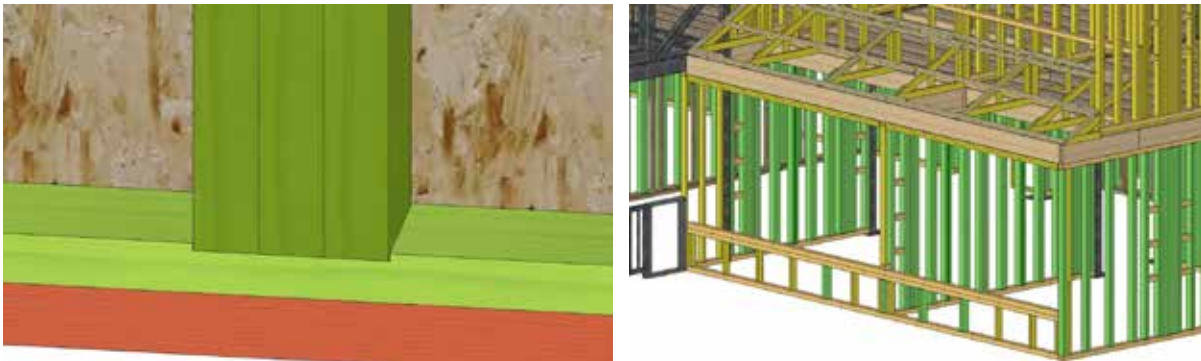


Figura 26. Densidad elevada de montantes para paneles en proyectos de E2E. Fuente: E2E (2025)

2.2.7 Diseño arriostrado

Para esta investigación se optó por no incorporar placas arriostrantes, como OSB, debido a que el prototipo se concentra en la estructura principal del panel y en el comportamiento de sus uniones carpinteras mecanizadas. El cierre mediante tableros, revestimientos, aislación o terminaciones queda fuera del alcance, ya que podría variar según los requerimientos de cada proyecto.

En su lugar, se incorporaron diagonales de madera como estrategia de arriostramiento desmontable. Estas piezas permiten contribuir a la estabilidad geométrica del panel frente a acciones laterales, manteniendo al mismo tiempo la lógica de montaje, desmontaje y reensamblaje del sistema. A diferencia de una placa fijada mediante clavos o tornillos, las diagonales pueden retirarse, reemplazarse o reutilizarse sin dañar los componentes principales.

Aunque en la normativa chilena no se identificaron criterios específicos desarrollados para este tipo de arriostramiento en muros estructurales, sí fue posible reconocer recomendaciones y

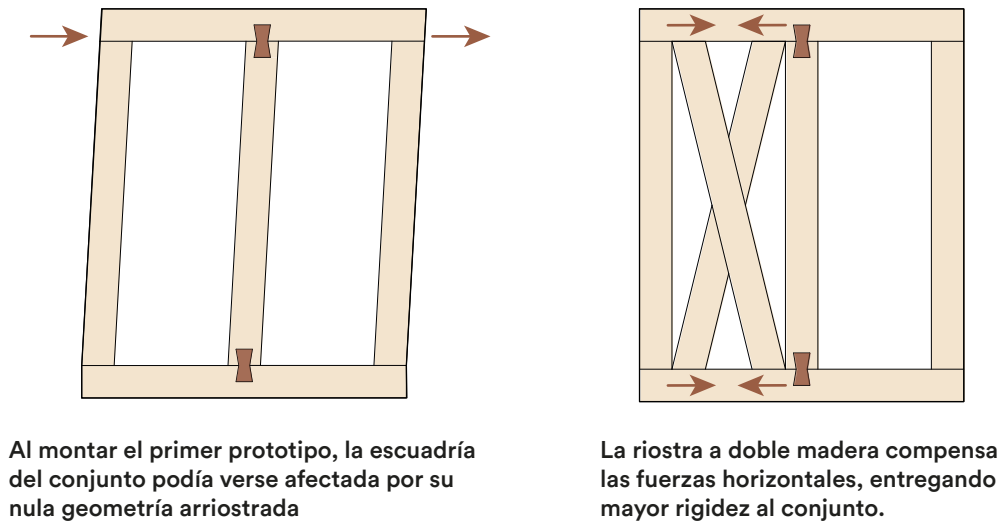


Figura 27. Diagrama de rigidez por riostras. Elaboración propia

criterios basados en literatura técnica referentes a la carpintería estructural. A partir de estos antecedentes, se decidió ubicar el eje de las diagonales a una distancia equivalente a 1,5 veces la sección de la pieza respecto del extremo de la solera. Considerando una sección de 90 mm, esta distancia corresponde aproximadamente a 135 mm.

Esta decisión permitió evitar que el mecanizado de la diagonal quedara demasiado próximo al extremo de la solera, reduciendo el riesgo de debilitamiento local, fisuras o fallas por concentración de esfuerzos. Asimismo, esta separación favoreció una mayor superficie de apoyo y permitió mantener una distancia prudente entre el encaje de la diagonal y las zonas críticas de unión con los postes.

2.2.8 Dimensiones y elementos

Aunque los fundamentos de esta investigación se apoyan en el diseño paramétrico, tanto para la configuración general del panel como para la disposición de sus uniones, se definen medidas base estandarizadas con el fin de facilitar el montaje, el transporte, la fabricación y la comparación entre variaciones del sistema.

Para efectos prácticos, se consideran dimensiones asociadas a formatos repetibles y habituales en el mercado chileno, especialmente aquellas vinculadas a la modulación de tableros, paneles y sistemas de entramado ligero. A partir de estos criterios, se definen tres dimensiones de referencia para el desarrollo del sistema (ancho x alto para alturas libres):

- 1,2 × 2,4 metros
- 2,4 × 2,4 metros
- 3,6 × 2,4 metros

La distancia entre pies derechos o postes se definió tomando como referencia las modulaciones habituales en sistemas de entramado ligero y los criterios señalados en la Guía de soluciones constructivas para la industrialización (Centro UC, 2023), donde se reconocen separaciones cercanas a 60 cm entre elementos verticales. Para esta investigación, se conservaron distancias aproximadas a dicha modulación, distribuyendo los postes de manera equidistante dentro del

panel. No obstante, la configuración definitiva de los postes, su sección, separación y cantidad deberá responder a las solicitudes establecidas por cálculo estructural.

Por último, se definieron los elementos principales presentes en un panel de carpintería ligera y se adaptaron a la lógica constructiva del sistema propuesto. Estos componentes, junto con su función dentro del panel, se resumen en la siguiente tabla.

Elementos permanentes	Elementos adicionales
Solera inferior	Riostras
Poste o pie derecho	Cadenetas
Solera superior	Dintel de canto
	Refuerzos
	Alféizar
	Dintel

Tabla 01. Elementos estructurales considerados para el diseño del panel. Elaboración propia

2.2.9 Izaje

El sistema de caja y espiga permite resolver el encaje entre elementos mediante una dirección principal de montaje, generalmente asociada a la acción de la gravedad durante el armado. Si bien esta unión puede funcionar eficientemente al restringir desplazamientos horizontales y limitar el volcamiento de los postes durante el ensamblaje, no necesariamente está concebida para permitir el izaje del panel como una unidad completa. Por esta razón, la investigación explora la incorporación de un elemento de unión permanente que contribuya al amarre del conjunto durante operaciones de manipulación, alzado y eventual traslado.

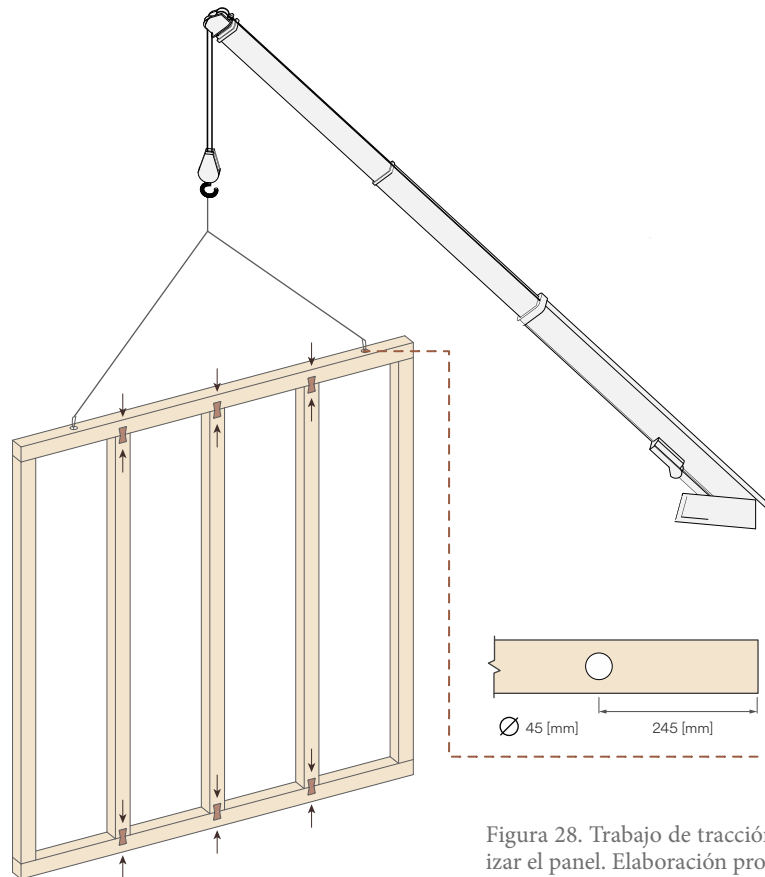


Figura 28. Trabajo de tracción al momento de izar el panel. Elaboración propia

En este contexto, la incorporación de una unión tipo llave entre los postes centrales y las soleras busca restringir dichos desplazamientos y contribuir al amarre general del conjunto. A diferencia de una caja y espiga convencional, esta pieza permite la continuidad entre componentes, favoreciendo que el panel se comporte como una unidad ensamblada durante su manipulación.

De manera complementaria, se considera la posibilidad de utilizar un sistema de izaje tipo Dragon, basado en correas de elevación con comportamiento basculante. Este sistema requeriría incorporar un mecanizado circular de 45 mm de diámetro a unos 245 mm de distancia de los bordes en la solera superior, destinado al paso o fijación de la correa de elevación. Su integración se plantea como una estrategia preliminar para estudiar la manipulación del panel ensamblado, considerando que su aplicación definitiva deberá ser verificada mediante criterios de carga, resistencia local de la solera, estabilidad del conjunto y seguridad durante el levantamiento.

2.2.10 Condición de apilamiento y almacenamiento

El apilamiento y almacenamiento de las piezas de madera constituye una condición relevante para mantener su estabilidad dimensional antes del proceso de mecanizado y montaje. Debido a que la madera es un material higroscópico, las variaciones de humedad, temperatura, ventilación y exposición solar pueden generar deformaciones, alabeos o cambios dimensionales que afecten la precisión de las uniones carpinteras.

Para reducir estos efectos, se consideran los siguientes criterios de almacenamiento:

- Se deben disponer listones separadores entre las piezas, permitiendo la circulación de aire dentro del apilamiento.
- Los listones deben alinearse verticalmente y separarse aproximadamente un metro entre sí, con el fin de distribuir las cargas de manera uniforme y evitar deformaciones.
- Las piezas deben mantenerse separadas del suelo, evitando el contacto directo con humedad o superficies irregulares.
- Las condiciones de almacenamiento deben proteger la madera de la luz solar directa y el viento, además de evitar los cambios bruscos de temperatura (The Complete Japanese joinery, 1995)

Estas condiciones resultan especialmente importantes para la investigación, ya que pequeñas variaciones geométricas en las piezas pueden incidir directamente en el calce de las uniones, la aparición de holguras, la dificultad de montaje y la precisión del mecanizado.

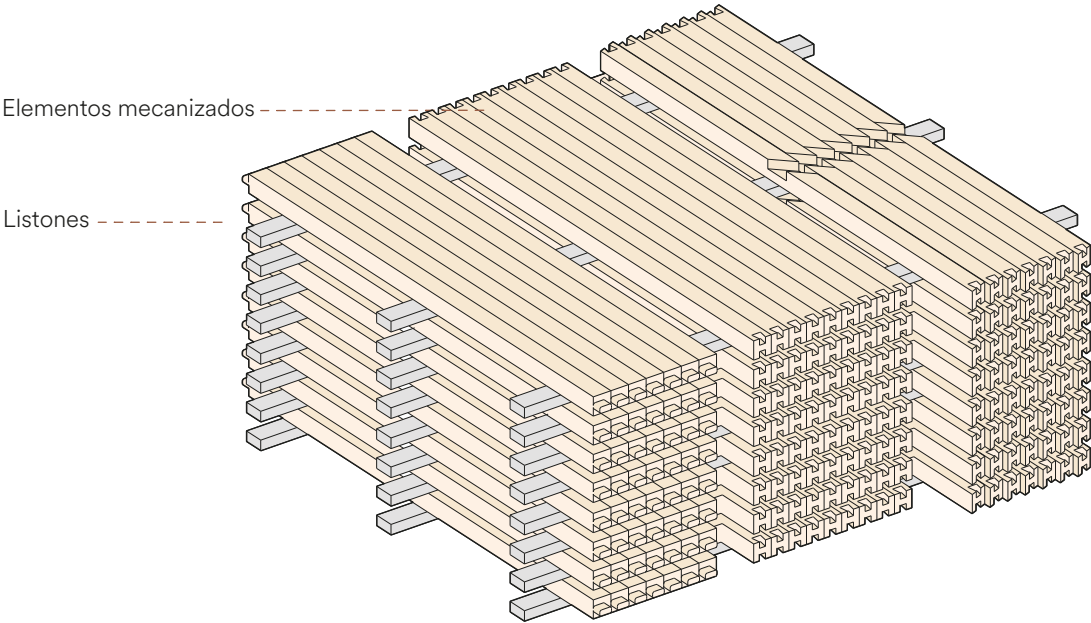


Figura 29. Condición de apilamiento. Elaboración propia

2.2.11 Transporte

Al considerar un sistema diseñado para ser montado mediante distintas secuencias de ensamblaje, se abre también la posibilidad de optimizar su transporte y acopio. A diferencia de un panel completamente armado o semiterminado, el traslado de sus componentes desarmados permitiría aprovechar de mejor manera el volumen disponible en un camión, reduciendo espacios vacíos entre elementos y facilitando una distribución más compacta de las piezas.

Asimismo, esta condición podría favorecer el transporte del sistema en vehículos de menor tamaño, lo que resulta relevante en contextos donde el acceso de camiones puede verse limitado por las condiciones del terreno, el ancho de las vías o la lejanía del sitio de montaje. En este

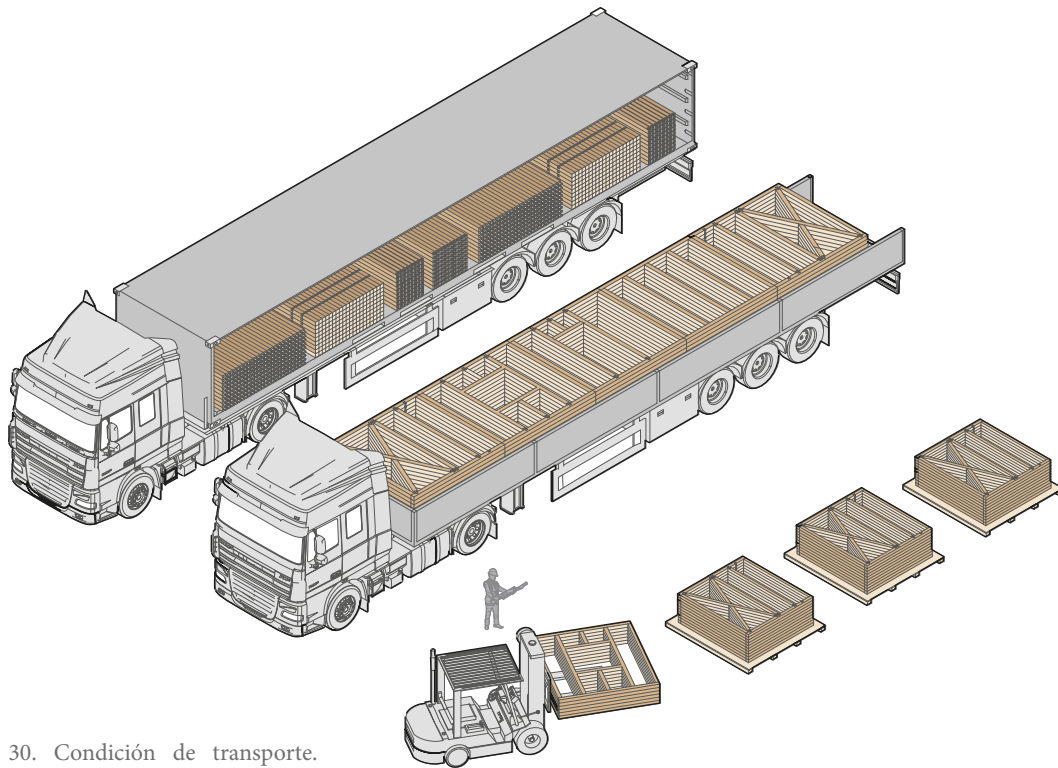


Figura 30. Condición de transporte.
Elaboración propia

sentido, la capacidad de transportar el panel desarmado no solo constituye a una ventaja logística potencial, sino que también refuerza la eficiencia de acopio y adaptabilidad del sistema a distintos escenarios de emplazamiento.

Se debe considerar también un sistema de etiquetado o identificación para cada panel o elemento, que permita reconocer claramente su ubicación, orientación y secuencia dentro del proyecto. Asimismo, es fundamental coordinar previamente el orden de montaje y descarga de los elementos, de manera que estos lleguen a obra organizados según la secuencia constructiva, evitando manipulaciones innecesarias, tiempos muertos y errores durante la instalación (Juárez et al., 2025).

2.2.12 Peso y manipulación de los elementos

De acuerdo con lo establecido en los artículos 211-H y 211-J del Código del Trabajo, modificados por la Ley N° 20.949 del Ministerio del Trabajo y Previsión Social, la manipulación manual de

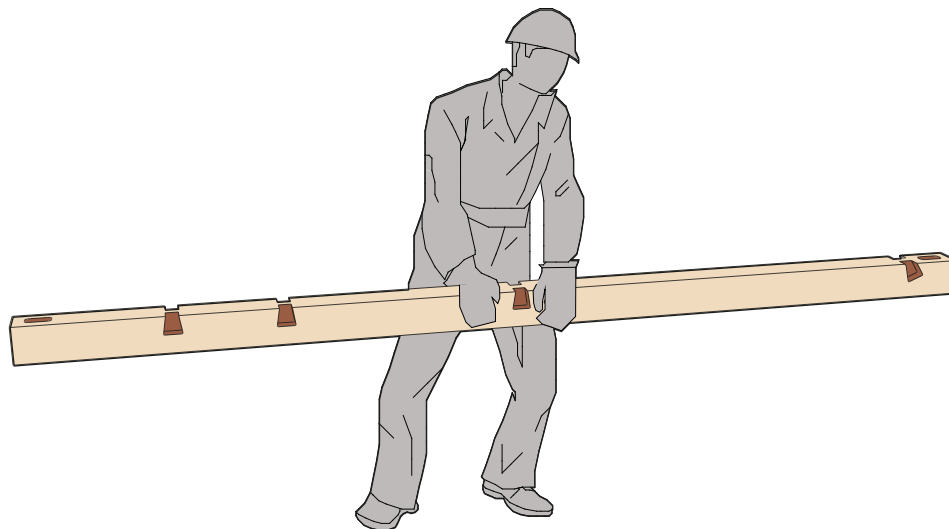


Figura 31. Diagrama de operador trasladando una pieza. Elaboración propia

cargas no debe superar los 25 kg cuando no sea posible utilizar ayudas mecánicas, mientras que para mujeres y menores de 18 años el límite máximo corresponde a 20 kg. A partir de estos valores, la presente investigación utiliza dichos rangos como referencia para evaluar el peso de paneles de 2,4 m y 3,2 m, calculados para pino radiata y pino Oregón, con el objetivo de analizar su viabilidad de manipulación, montaje y desmontaje manual dentro de un sistema constructivo industrializado.

Para estimar el peso de los paneles, se consideró el volumen total de madera y una densidad aparente asociada a la especie utilizada. Bajo este criterio, un panel típico de tabique de 2,4 × 2,4 m, conformado por piezas de 4 × 4” en pino radiata, tendría un peso aproximado de 61 kg. En cambio, un panel típico de ampliación, con características similares pero mayor cantidad de elementos, alcanzaría aproximadamente 72 kg.

$$P=V\times\rho(12\%)$$

Parámetro	Longitud	Densidad a (12 %)	Peso
Solera o poste en pino radiata	2400 mm	450 kg/m ³	8,75 kg
Solera o poste en pino radiata	3200 mm	450 kg/m ³	11,66 kg
Solera o poste en pino oregón	2400 mm	540 kg/m ³	11,50 kg
Solera o poste en pino oregón	3200 mm	540 kg/m ³	14,00 kg

Tabla 02. Peso de elementos en pino radiata y pino oregón. Elaboración propia

2.3 UNIONES

A diferencia de las uniones metálicas, cuyo comportamiento estructural suele depender de la deformación plástica de conectores como clavos, tornillos, pernos o placas, las uniones carpinteras transmiten esfuerzos principalmente mediante la geometría de las piezas, el contacto entre superficies, la compresión, tracción y corte de la madera. Esta condición permite reducir la dependencia de elementos externos y favorece estrategias de desmontaje y reensamblaje; sin embargo, también implica un comportamiento más sensible a la precisión dimensional, orientación de la veta, humedad, holguras y concentración de esfuerzos.

En esta investigación, las uniones carpinteras no se presentan como un reemplazo estructural ensayado de las uniones metálicas frente a cargas sísmicas, sino como una alternativa constructiva orientada a explorar desmontabilidad, precisión geométrica y reensamblaje. Su desempeño estructural y sísmico deberá ser evaluado posteriormente mediante cálculo específico y ensayos mecánicos.

Por otro lado, las dimensiones y proporciones adquieren un rol determinante en el desempeño del sistema. A diferencia de una unión metálica, donde parte importante de la resistencia y ductilidad puede concentrarse en el conector, en una unión carpintera la propia madera debe asumir la transmisión de esfuerzos. Por ello, la sección disponible, la profundidad de mecanizado, la dirección de la fibra y las tolerancias de fabricación condicionan directamente la viabilidad del encaje, su capacidad de armado y su posible reutilización.

2.3.1 Criterios geométricos del encaje

La sección mínima necesaria para que un encaje carpintero sea funcional no tiene una respuesta única, ya que depende del tipo de unión, la especie de madera, la dirección de la fibra y las cargas esperadas en su etapa final. A diferencia de las uniones metálicas normalizadas, muchas uniones carpinteras tradicionales se han desarrollado a partir de criterios empíricos. Por esta razón, textos como *The Complete Japanese Joinery* y *The Art of Japanese Joinery* permiten reconocer recomendaciones generales que pueden orientar el diseño preliminar de este tipo de encajes. En

términos generales, una unión es funcional si se considera que:

- La unión no fragiliza el elemento portante
- Puede fabricarse con tolerancias reales
- Transmite los esfuerzos correctamente
- Las proporciones de volumen retirado y sección restante son apropiadas
- Se recomienda mecanizar $1/3$ de la sección y como máximo $2/3$ para ciertos puntos estratégicos.
- El eje neutro del elemento no debe quedar interrumpido
- La fibra continua es prioritaria frente a la geometría sofisticada
- La longitud de las espigas debe ser de al menos 4 a 5 veces su propio espesor para una buena resistencia al volcamiento.

Aunque estas proporciones pueden variar según el autor, en esta investigación se simplifican como criterios de diseño preliminar. Esta decisión permite asegurar mayor repetibilidad, facilitar el mecanizado robotizado y mantener una lógica constructiva simple.

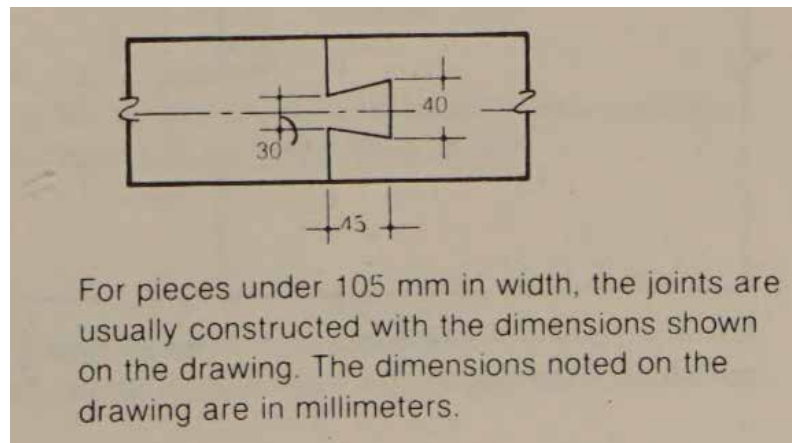


Figura 32. Proporciones utilizadas para la cola de milano. Fuente: *The Art of Japanese Joinery* (1977)

2.3.2 Especie en roble

La elección del roble para las piezas de unión responde a la necesidad de incorporar un material de mayor dureza y densidad en zonas críticas del sistema. A partir de la revisión de referentes de carpintería estructural contemporánea, como proyectos desarrollados por StructureCraft, se observa el uso de especies más densas en elementos de conexión o transferencia de esfuerzos entre piezas principales de madera. Estas soluciones suelen ubicarse en puntos donde se concentran solicitaciones de tracción, compresión o corte, y donde la resistencia local del material resulta determinante para mantener la continuidad del conjunto.

En el caso de esta investigación, el roble se propone como material para las llaves de unión debido a que estas piezas cumplen una función de amarre entre postes y soleras, restringiendo desplazamientos relativos y colaborando en la continuidad del panel durante el izaje y montaje. Su mayor dureza respecto del pino radiata permite plantearlo como una alternativa adecuada para zonas donde el contacto entre superficies, el ajuste geométrico y la resistencia al desgaste adquieren mayor relevancia.

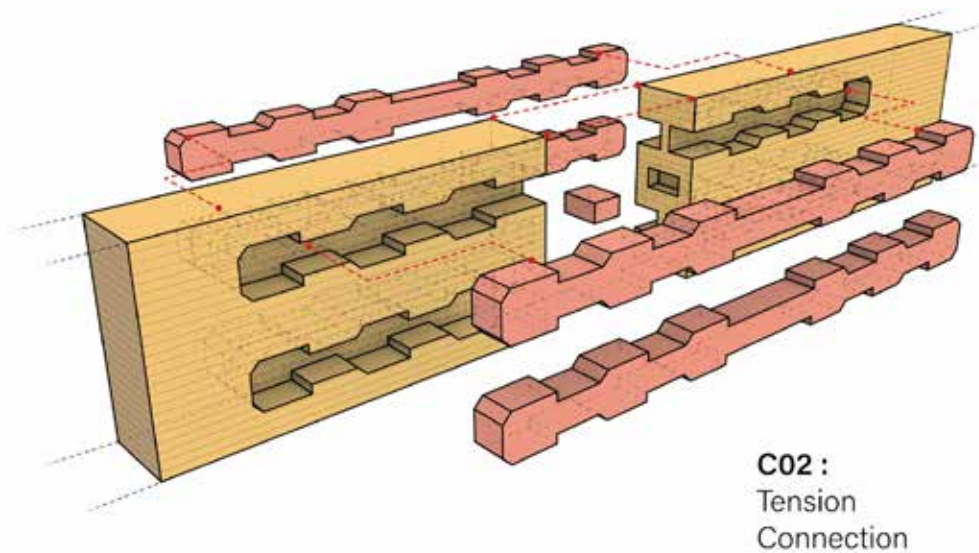


Figura 33. Ejemplo de proyecto con distintos usos de diversas especies de madera. Fuente: StructureCraft (2025).

No obstante, esta decisión se entiende como un criterio material y constructivo preliminar, no como una validación estructural definitiva. El desempeño resistente de estas uniones deberá ser verificado en etapas posteriores mediante cálculo específico y ensayos mecánicos.

2.3.3 Grados de libertad

A pesar de que en esta investigación se trabajó con un robot industrial tipo KUKA KR 210 R3100-2 C, el cual contiene 7 grados de libertad, se exploró la posibilidad de trabajar con uniones que requirieran más de un grado de libertad para ser unidas. La desventaja de explorar uniones más complejas, recae en las libertades que puede ofrecer la herramienta propia del robot, por ejemplo, aunque se pudiera trabajar con una trayectoria inclinada, la fresa permite trabajar en su propio plano, afectando directamente en la trayectoria de entrada de la fresa y la geometría final obtenida. Además, para garantizar montaje eficiente, se recomienda simplificar lo más posible la geometría de las uniones, ya que al momento de complejizarlas más, mayores son los desafíos asociados a la fabricación, montaje y lectura de estas.

Las uniones finalmente fabricadas pueden llegar a ser mecanizadas en un futuro, por una máquina router CNC, de al menos 200 mm de altura libre.

La única pieza que no se podría trabajar en una router CNC corresponde al poste con espiga, ya que su largo no permite posicionar la cara que va a ser mecanizada perpendicular a la fresa de una router, ya que el área libre en Z es muy estrecha, además, se recomienda trabajar con la misma herramienta (en este caso el robot) para mantener las propiedades inherentes asociadas a este, tales como trayectorias, vibraciones, frecuencias y velocidades deberían ser las mismas para proporcionar una metodología consistente a lo largo de todo el trabajo.

2.3.4 Unión de llave de mariposa (“Chigiri-tsugi”)

La unión de llave de mariposa, o Chigiri-tsugi, corresponde a un tipo de unión carpintera utilizada tradicionalmente para vincular dos piezas mediante una llave insertada en una cavidad de geometría similar. En términos generales, se asocia a juntas de empalme o continuidad, donde permite conectar dos elementos para formar una pieza de mayor longitud o restringir

su separación. En esta investigación, si bien se reconoce su uso habitual en empalmes longitudinales, se aprovecha su potencial como elemento de amarre entre postes y soleras.

Esta unión fue seleccionada debido a que presenta una única dirección de encaje, una geometría relativamente simple de mecanizar y permite restringir desplazamientos verticales o relativos entre las piezas durante operaciones de manipulación, montaje o eventual izaje del panel. Su lógica de funcionamiento se basa en el calce geométrico de la llave dentro de las cajas receptoras, generando una condición de traba que contribuye a mantener la posición de los elementos conectados.

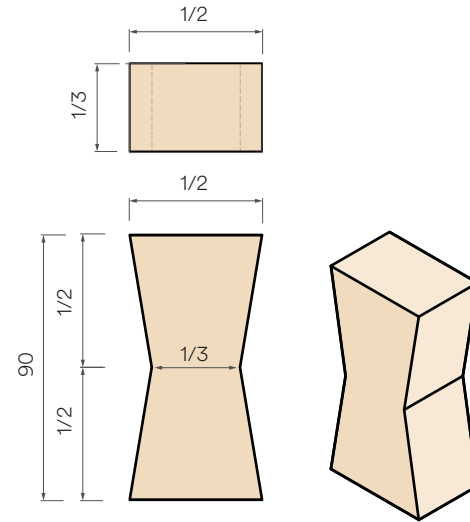


Figura 34. Proporciones de la pieza de unión
Elaboración propia

Para el desarrollo del prototipo, la caja de la llave se diseñó con una profundidad aproximada de un tercio de la sección de la pieza. Con el objetivo de aumentar la estabilidad del conjunto, se optó por mecanizar la unión en ambas caras del elemento, generando dos llaves independientes. Esta decisión permitió distribuir la función de amarre entre ambos lados del panel y reducir la dependencia de una única unión. De esta manera, si una de las llaves presentaba menor fricción o una holgura mayor producto de las tolerancias de fabricación, la llave opuesta podía contribuir a compensar el ajuste y limitar el desplazamiento de la pieza.

Durante el proceso de diseño se descartó la alternativa de desarrollar una unión pasante completa atravesando el eje central del poste. Esta decisión respondió a dos razones principales. En primer lugar, una caja continua podía debilitar excesivamente el elemento vertical al interrumpir su sección central, afectando potencialmente la transferencia de esfuerzos dentro del sistema. En segundo lugar, una única unión pasante habría dependido en mayor medida de su holgura: si el ajuste era demasiado estrecho, podía dificultar el desmontaje, mientras que si era demasiado holgado, podía reducir su capacidad de amarre.

Finalmente, el uso de una llave independiente presenta una ventaja constructiva relevante respecto de un encaje tallado directamente desde el poste o la solera. Al tratarse de una pieza separada, su fabricación y eventual reemplazo pueden realizarse sin comprometer directamente el elemento principal. Además, al no formar parte continua de la fibra del poste o de la solera, se reduce el riesgo de fractura del elemento estructural durante el montaje, manipulación o traslado del panel, ya sea armado o desarmado.

Para el resto de las uniones, como la caja y espiga, la decisión se basó en investigaciones previas desarrolladas en laboratorio, donde este tipo de encaje ya había sido explorado como una solución simple, precisa y compatible con procesos de mecanizado robotizado. Su incorporación permitió resolver el vínculo entre postes exteriores y soleras mediante una geometría de fácil lectura constructiva y una dirección de montaje controlada.



Figura 35. Demostración bibliográfica de unión tipo llave. Fuente: The Joinery Compendium. Learning from Traditional Woodworking (2024)

2.3.5 Caja y espiga

Dentro del sistema, los postes exteriores cumplen un rol fundamental en la definición del encuadre general del panel. Al vincularse con las soleras mediante uniones de caja y espiga, contribuyen a fijar la posición de los elementos verticales y a restringir sus desplazamientos en el eje X. Esta condición se complementa con la función de los postes centrales y sus llaves de unión, las cuales restringen principalmente los desplazamientos en el eje Z, asociados al levantamiento o separación vertical de las piezas. De esta manera, ambos tipos de unión trabajan de forma complementaria para controlar la posición relativa de los componentes y mantener la estabilidad geométrica del conjunto durante el montaje, manipulación y desmontaje del panel.

Como último criterio, se descartó el uso de varillas pasantes, tarugos largos o tornillos de madera como sistema principal de unión, debido a que estas soluciones podían dificultar algunos de los criterios centrales de la investigación. En primer lugar, al atravesar completamente los elementos o sobresalir hacia las caras del panel, podían interferir con la hipotética incorporación posterior de revestimientos. Asimismo, la necesidad de coordinar las perforaciones para estos elementos con las uniones carpinteras previamente mecanizadas habría aumentado la complejidad del proceso y la acumulación de tolerancias, incrementando la probabilidad de desfases durante la fabricación y el ensamblaje.

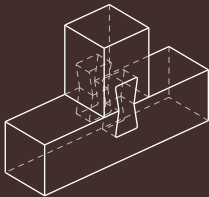
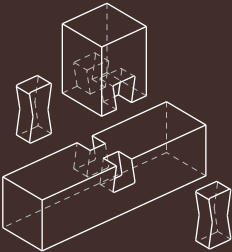
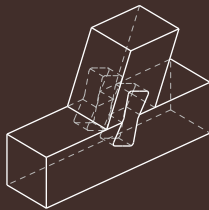
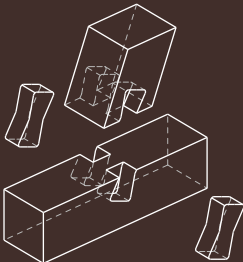
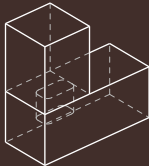
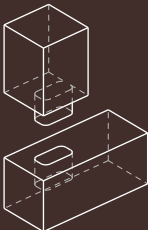
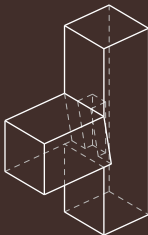
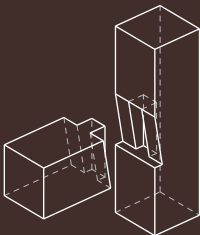
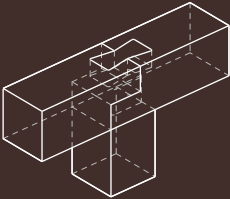
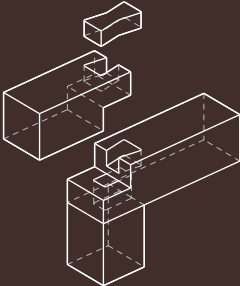
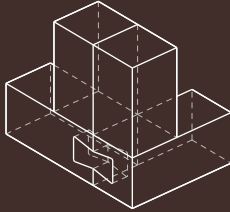
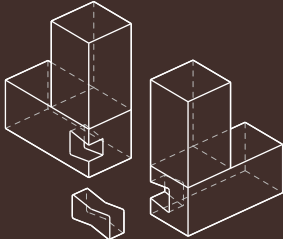
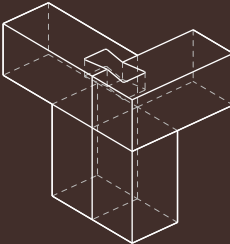
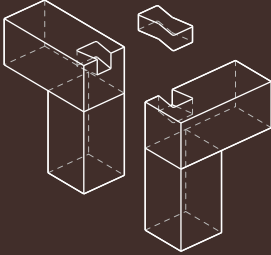
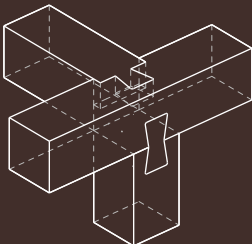
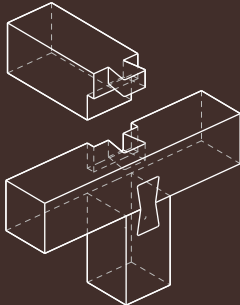
	Unión Cerrada	Unión abierta	Cantidad de elementos	Grados de libertad	Cargas asociadas
Unión a tope con llave de mariposa			4	x- axis	x (pressure) y (pressure) z (pressure) z (tension) a (moment) b (moment) c (moment)
Unión a tope con llave de mariposa en diagonal			4	x- axis	x (pressure) y (pressure) y (tension) z (pressure) z (tension) a (moment) b (moment) c (moment)
Caja y espiga a 2/3			2	z- axis	x (pressure) y (pressure) y (tension) z (pressure) z (tension) a (moment) b (moment) c (moment)
Caja y espiga con hombros biselados			2	x- axis z- axis b- axis momento	x (pressure) z (pressure) y (pressure) y (tension) c (moment) a (moment)

Figura 36. Diagrama universal de uniones utilizadas en la investigación, basado en [joints.web.th-koeln \(2026\)](https://joints.web.th-koeln.de/) y *The Complete Japanese Joinery* (1995)

	Unión Cerrada	Unión abierta	Cantidad de elementos	Grados de libertad	Cargas asociadas
Unión de esquina traslapada con dentado inclinado			3	z- axis	x (pressure) x (tension) y (pressure) y (tension) z (pressure)
Caja y espiga con barbilla			2	z- axis b- axis momento	x (pressure) z (pressure)
Unión a media madera o cruz de San andrés			2	x- axis	x (pressure) y (pressure) y (tension) z (pressure) z (tension) a (moment) b (moment) c (moment)
Caja y espiga			2	z- axis	x (pressure) z (pressure) y (pressure) y (tension) c (moment) a (moment)

	Unión Cerrada	Unión abierta	Cantidad de elementos	Grados de libertad	Cargas asociadas
Encuentro de empalme			4	z- axis	x (pressure) y (pressure) y (tension) z (pressure) a (moment) b (moment) c (moment)
Encuentros de empalme con doble poste (Inferior)			3	x- axis	x (pressure) y (pressure) y (tension) z (pressure) z (tension) a (moment) b (moment) c (moment)
Encuentros de empalme con doble poste (Superior)			3	z- axis	x (pressure) x (tension) y (pressure) z (pressure) a (moment) b (moment) c (moment)
Encuentro en "T"			2	z-axis a-axis momento	x (pressure) x (tension) y (pressure) z (pressure) a (moment) b (moment) c (moment)

2.4 PRUEBAS A ESCALA 1:10

Para el desarrollo de modelos a escala 1:10, se seleccionó MDF de 3 mm como material base. La lógica detrás de esta elección radica en la posibilidad de laminar tres placas mediante encolado, obteniendo una sección final de 9 mm, equivalente a las dimensiones de los elementos en dicha escala.

Las ventajas de este material para la etapa de ensayo radican en su alta densidad y rigidez, así como en su superficie homogénea y lisa, lo que permite alcanzar un buen nivel de precisión en el corte mediante CNC láser. En este sentido, el MDF se comporta como un material adecuado para la fabricación de prototipos, al reproducir de manera aproximada pero consistente las condiciones geométricas requeridas.

La razón por la que se está trabajando a esta escala es poder experimentar a través de diferentes propuestas la secuencia de montaje, es decir, resolver cómo y de qué manera van unidos los elementos antes de levantar completamente el panel, asegurándose de que no haya conflictos entre las uniones y los empalmes.

2.4.1 Exploración de tipos de encuentros

A partir de la observación de sistemas panelizados y entramados existentes, se propone una simplificación operativa en tres tipos de encuentros entre paneles: encuentro en esquina “L”, encuentro de continuidad o empalme y encuentro en “T”.

El primero, encuentro en esquina, corresponde a la unión de dos paneles en configuración “L”, generando una junta a 90°. Su objetivo es permitir el cierre perimetral del sistema, posibilitando la conformación de recintos. El segundo, encuentro de continuidad, se define como la unión entre paneles en una misma dirección, de manera paralela y contigua al panel original. Este encuentro permite extender el sistema en longitud, facilitando la agregación de paneles que incorporen o no otras complejidades. Por último, el encuentro en “T” corresponde a la unión perpendicular de un panel respecto de otro, formando un ángulo de 90° en uno de sus lados. Su

función principal es permitir la incorporación de tabiques o elementos transversales, contribuyendo, si se requiere, a la rigidización del sistema en el eje perpendicular.

2.4.2 Encuentro de continuidad

El objetivo de este empalme es prolongar piezas longitudinales con la finalidad de que dos elementos funcionen como solo una pieza, transmitiendo o distribuyendo los esfuerzos ya sean de compresión, tracción, flexión o corte por igual sin comprometer la estructura. Si bien en la literatura existen diversas maneras de resolver el empalme entre dos elementos lineales, las recomendaciones para resolver este encuentro así como los otros son:

- La unión pueda restringir sus movimientos en el plano XY para evitar desplazamientos
- Tengan que ensamblarse verticalmente al panel principal
- Se puedan ensamblar a través de la solera inferior y superior simultáneamente
- No necesiten el uso de otro poste para apoyarse y transmitir cargas
- Sean fáciles de fabricar y manipular

Para el encuentro de continuidad, fue necesario considerar que el panel principal termina en un poste exterior. Por esta razón, resolver la continuidad entre paneles no implicaba

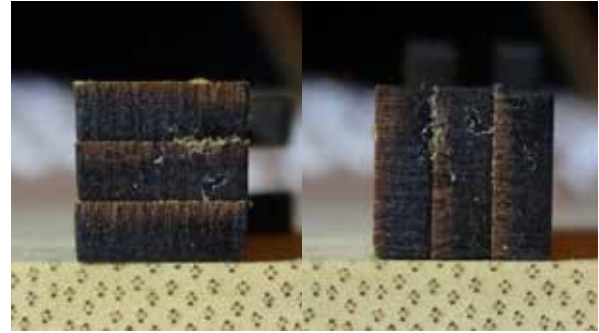


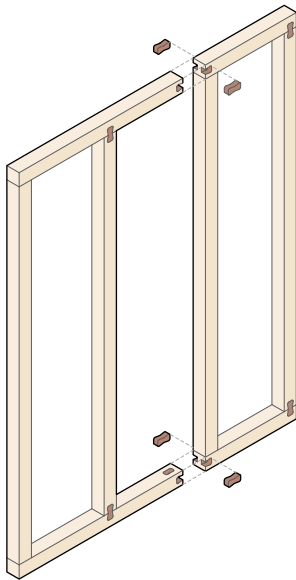
Figura 37. tres piezas de MDF de 3mm encoladas. Elaboración propia.

únicamente unir ambas soleras, sino también coordinar la relación entre poste exterior y solera, de manera que la unión permitiera una correcta transmisión de esfuerzos y mantuviera la estabilidad geométrica del conjunto.

Durante el proceso de diseño se exploraron dos alternativas iniciales de unión, ambas orientadas a evitar el uso de un doble poste en el punto de encuentro.

El primer diseño correspondió a una unión tipo llave lateral, basada en una geometría similar a la llave mariposa. Esta se ubicaba en las caras laterales de las soleras, permitiendo vincular la solera superior e inferior de ambos paneles. Su principal ventaja era la libertad de aproximación del panel secundario, ya que permitía acercarlo desde distintas direcciones de montaje. Sin embargo, esta misma libertad generaba una menor restricción frente a

AXONOMÉTRICA



ELEVACIÓN

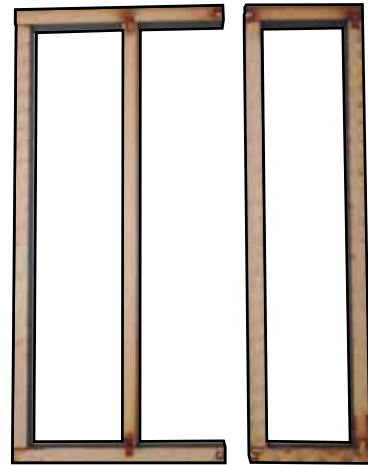
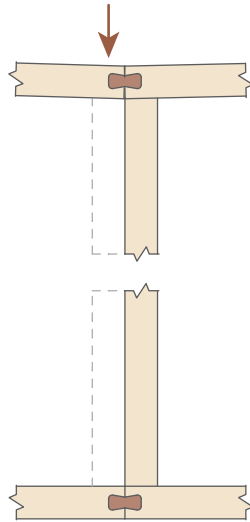


Figura 38. Fotografía del primer prototipo de empalme de continuidad. Elaboración propia

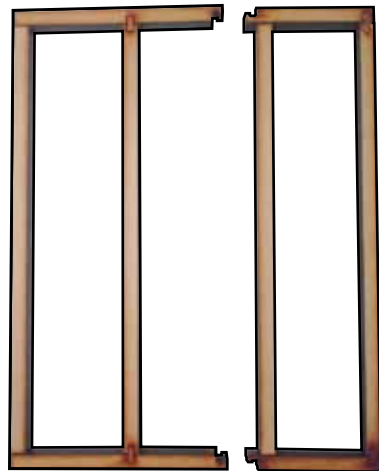
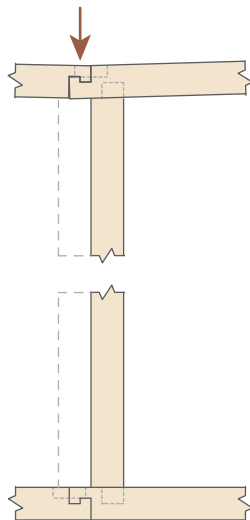
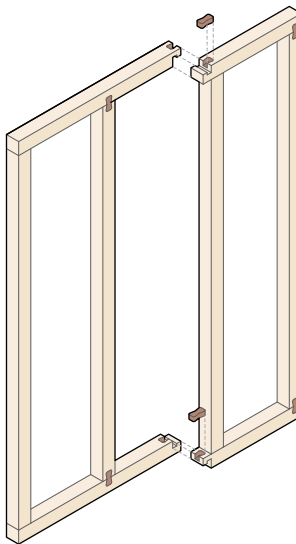


Figura 39. Fotografía del segundo prototipo de empalme de continuidad. Elaboración propia

ciertos giros, comprometiendo la rigidez del encuentro y dificultando el control preciso de la posición final del panel.

El segundo diseño mantuvo el concepto de unión mediante llave, pero incorporó una geometría dentada que permitía restringir el desplazamiento en el eje X, mientras que la llave controlaba principalmente el movimiento en el eje Y. Esta solución mejoraba parcialmente el control del desplazamiento entre paneles, pero seguía presentando problemas de alineación en la transmisión de esfuerzos, ya que las cargas no se conducían directamente a través del poste.

Considerando estas limitaciones, se optó por desarrollar una unión que mantuviera la lógica de doble caja en la cara superior de las soleras a unir, pero que permitiera conducir los esfuerzos directamente a través del poste exterior. Esta solución conserva el apoyo directo entre soleras, mejora la continuidad del conjunto y limita el giro en el eje correspondiente. De esta manera, la unión final retoma algunos principios del segundo diseño, pero simplifica su geometría y mejora la correspondencia entre ensamblaje, apoyo y transmisión de esfuerzos.

2.4.3 Encuentro en T

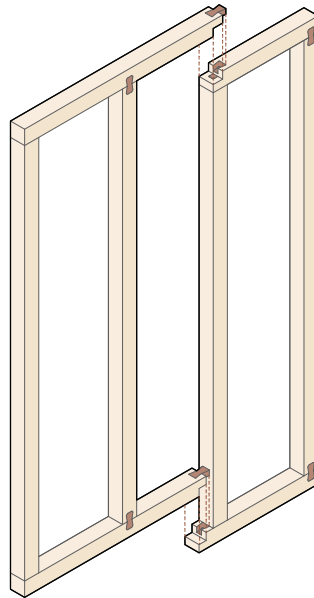
Para el encuentro en “T” se optó por utilizar la misma lógica que la unión anterior, adaptando una cola de milano rebajada hasta la mitad de su altura en la solera. Esta geometría permite que el panel quede restringido en los ejes X e Y, evitando desplazamientos laterales una vez ensamblado, mientras que su dirección principal de montaje se mantiene en el eje Z. La única desventaja de esta unión es que debe ser acoplada en un punto donde no interfiera con un pie derecho, para garantizar el correcto ensamble en la solera.

2.4.4 Encuentro en L

Para el encuentro en “L” se buscó evitar la duplicación de postes exteriores en la esquina, manteniendo una solución más simple y continua entre paneles. Para ello, se optó por una unión de esquina traslapada con dentado inclinado, cuya geometría permite restringir los desplazamientos en los ejes X e Y, dejando el eje Z como dirección principal de montaje y desmontaje.

Esta condición permite que los paneles se ensamblen verticalmente sobre las soleras, manteniendo una lógica de encaje controlada y compatible con el desmontaje posterior. Para resolver una secuencia progresiva de encuentros en “L”, se desarrolló un diagrama de montaje donde las soleras inferiores tipo A se posicionan primero en la base de la edificación. Posteriormente, los paneles tipo B reposan verticalmente sobre estas soleras inferiores tipo A, para finalmente cerrar el panel con la solera superior tipo A (ver figura 43).

Vista axonométrica



Elevación

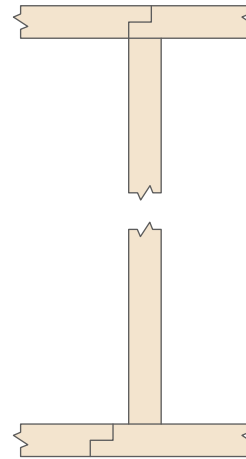
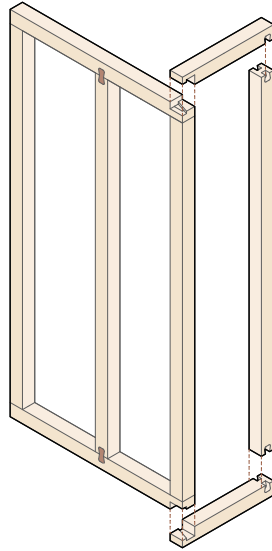


Figura 40. Tercer prototipo de unión de continuidad. Elaboración propia

AXONOMÉTRICA



ELEVACIÓN

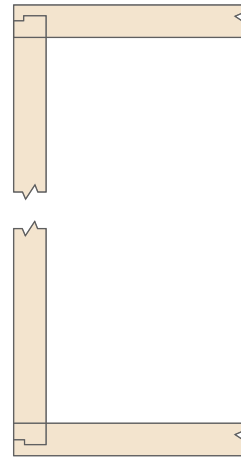


Figura 41. Prototipo de unión en “L”. Elaboración propia

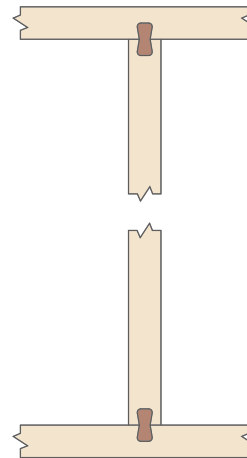
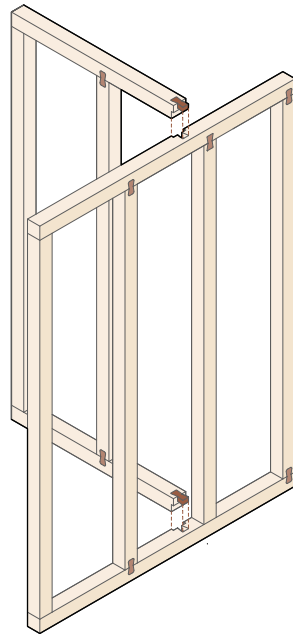


Figura 42. Prototipo de unión en “T”. Elaboración propia

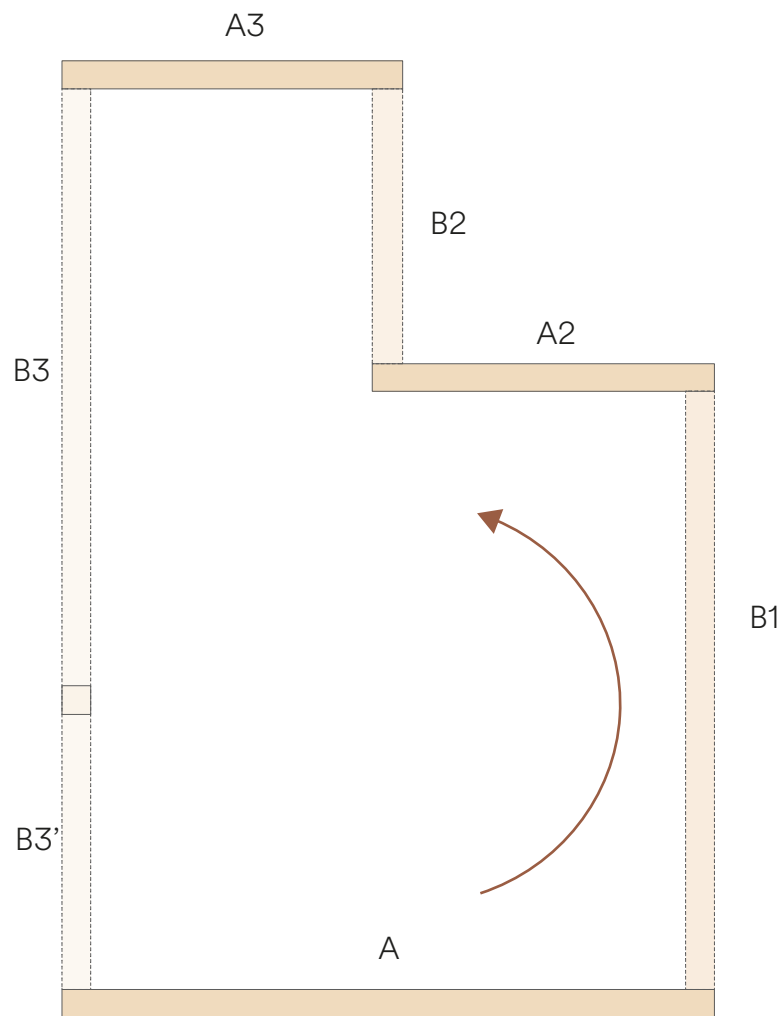


Figura 43. Secuencia de montaje entre paneles con encuentros tipo “L”. Elaboración propia

2.4.5 Desarrollo de tipologías

Con el fin de definir una muestra representativa para el desarrollo del sistema, se identificaron distintas tipologías de muro presentes de forma recurrente en una vivienda. Estas tipologías permiten reconocer variaciones programáticas y constructivas asociadas a la presencia de vanos, cerramientos continuos y posibilidades de crecimiento futuro. De esta manera las tipologías no se entienden como soluciones definitivas, sino como casos de estudio que permiten observar distintos grados de complejidad dentro del sistema propuesto. A partir de ello, se consideraron las siguientes configuraciones:

- Con vano - Puerta
- Con vanos - ventana
- Panel ciego / tabique
- Panel de ampliación

Para efectos de esta investigación, el desarrollo se centró en el panel estructural con posibilidad de ampliación. Esta tipología fue seleccionada por concentrar una mayor cantidad de elementos y condiciones de diseño, permitiendo evaluar simultáneamente el comportamiento de postes, soleras, diagonales, uniones carpinteras y criterios de montaje y desmontaje.

Además, la posibilidad de ampliación resulta especialmente relevante en el contexto de la vivienda industrializada, ya que distintos lineamientos técnicos asociados a programas habitacionales y a la revisión de soluciones por parte del MINVU/DITEC consideran el crecimiento progresivo como una condición importante para ciertos modelos de vivienda. En este sentido, la tipología seleccionada permite vincular el desarrollo del panel con criterios de adaptabilidad, desmontabilidad y eventual modificación del sistema en el tiempo.

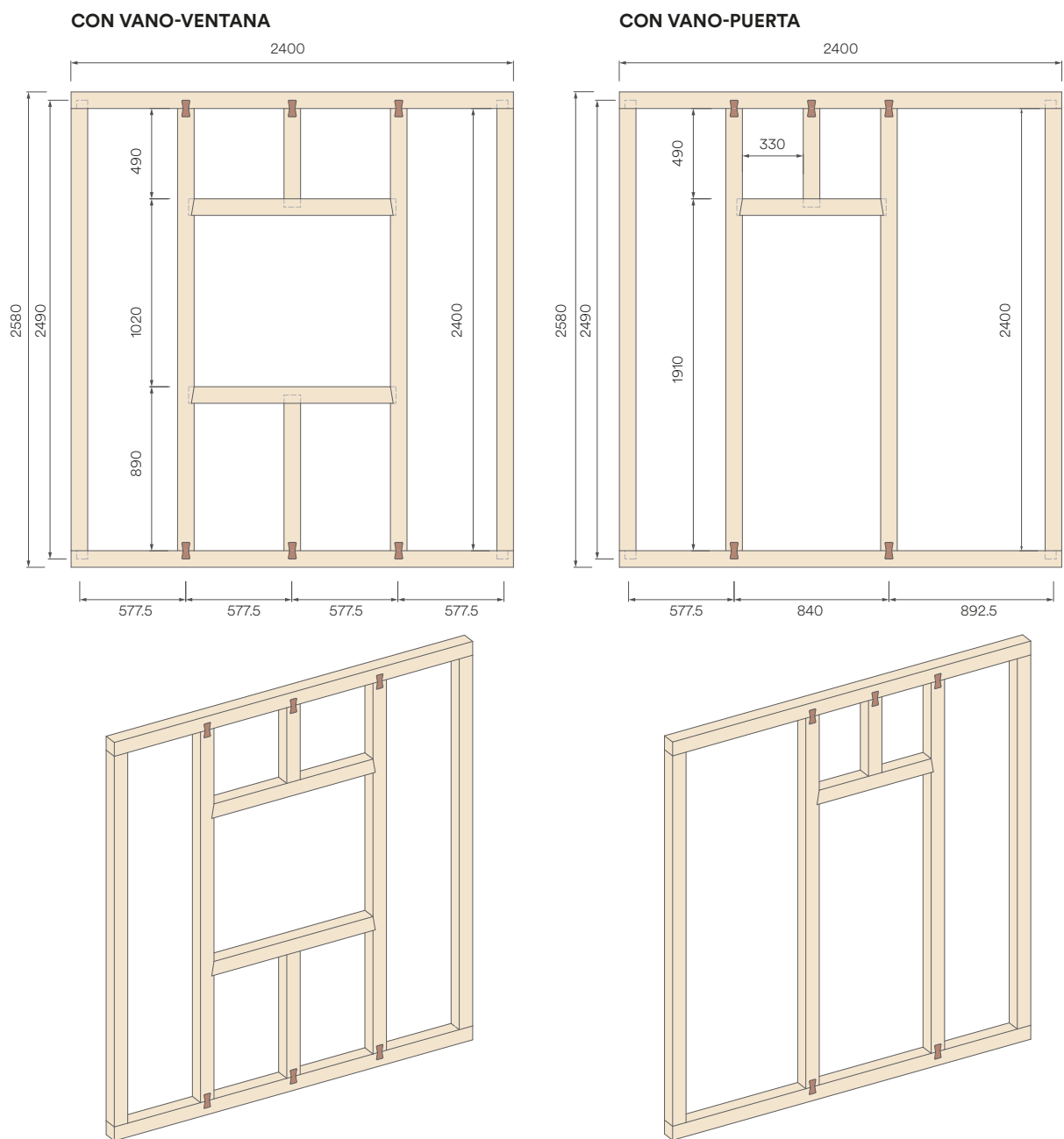
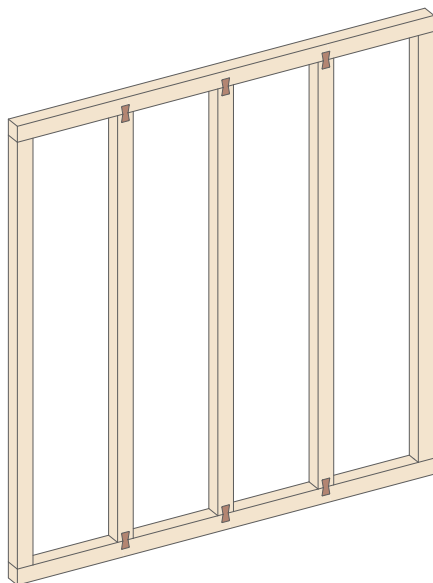
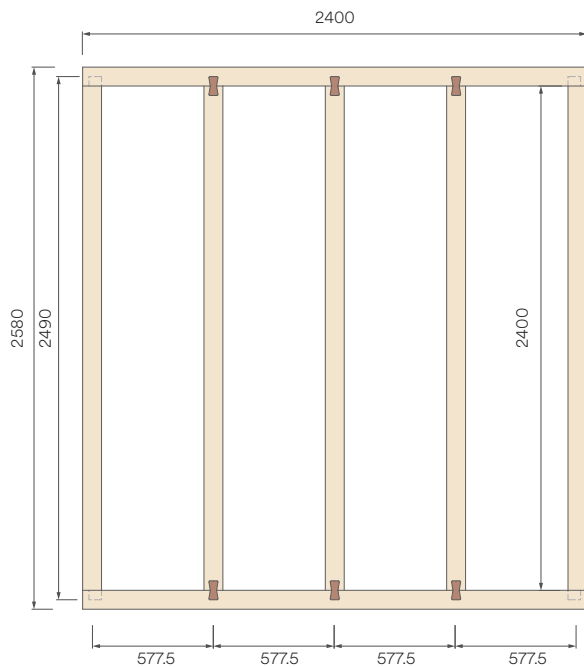
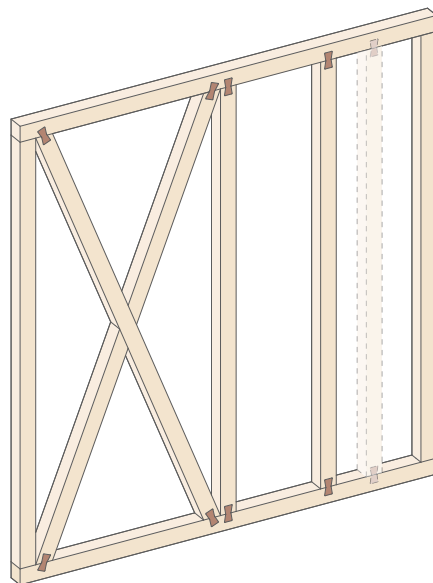
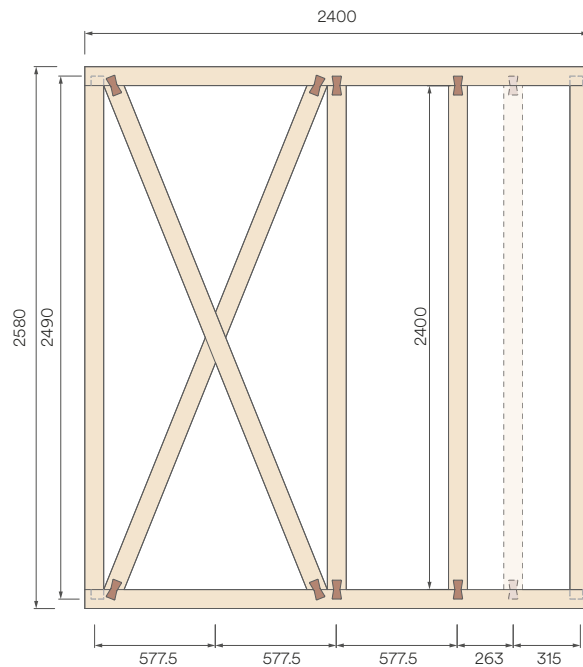


Figura 44: Vista en elevación y axonométrica de tipologías propuestas. Elaboración propia

TABIQUE



ARRIOSTRADO - AMPLIACIÓN



2.5 DESARROLLO DE PRIMER PROTOTIPO A ESCALA

Con el objetivo de comprender y visualizar las uniones propuestas, se plantea la construcción de un prototipo exploratorio previo al prototipo final, desarrollado a escala 1:1 a partir de un panel de ampliación reducido. Si bien el modelo reproduce secciones y encuentros reales, se opta por disminuir la longitud de los elementos para concentrar el análisis en el comportamiento de las uniones,

sus tolerancias de fabricación y su capacidad de ensamblaje.

El proceso de fabricación se realizó mediante operaciones manuales, esto permitió comprobar físicamente la lógica de ensamblaje antes de trasladar la geometría a un proceso mecanizado por un robot. Para esto se utilizaron diversas herramientas para tareas de corte, perforación y desbaste. Dado que el objetivo de esta etapa no fue evaluar la eficiencia productiva, no se registraron tiempos, sino que se priorizó la observación del proceso constructivo, la precisión de los encuentros y las dificultades asociadas al armado.

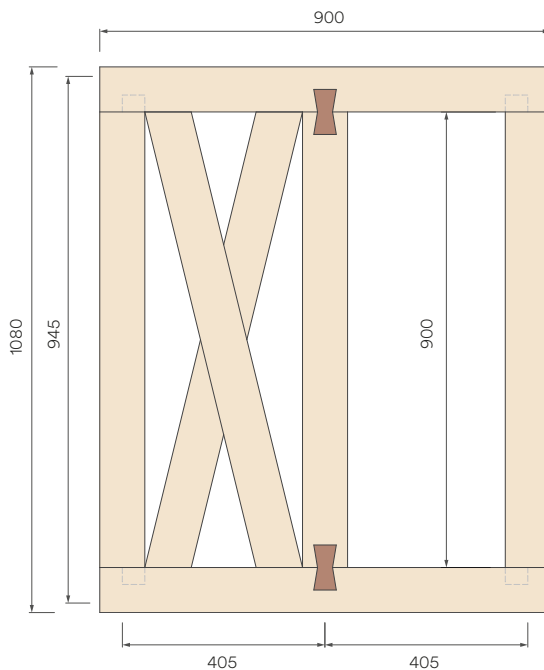


Figura 45. Elevación del primer prototipo. Elaboración propia

El trabajo se realizó en laboratorio utilizando piezas de roble para la unión de llave y piezas preelaboradas de aproximadamente 900 mm de longitud con una sección de 90 × 90 mm en pino oregón para los elementos estructurales (ver tabla 03). Esta reducción permitió acotar los tiempos de trabajo y, sobre todo, facilitar la manipulación de las piezas, haciendo posible su construcción por una sola persona sin afectar la fidelidad de las uniones estudiadas. Las herramientas con las que se realizó el trabajo van desde el uso de mazos, formones, taladros,

presas hasta herramientas de medición como escuadras o niveles. Además, se utilizó maquinaria pesada para los trabajos más complicados, como el corte de la longitud de los elementos, el sacado de grandes volúmenes como las concavidades de la doble madera, el uso de sierra huincha para replicar la llave. Como modo de prueba, se comenzó a fabricar el modelo físico sin las diagonales para probar de primera mano su rigidez a movimientos laterales, excluyendo los elementos 6 y 7.

En el caso específico de la unión tipo llave, se fabricaron plantillas mediante corte CNC láser en placas de MDF de 3 mm de espesor, las cuales se utilizaron para trazar con precisión la geometría sobre las piezas estructurales. Se definieron dos plantillas diferentes como figura A y figura B, donde la primera incorpora un desfase de 0,5 mm respecto de la segunda. Este ajuste responde a la necesidad de incorporar holgura en el sistema, permitiendo un correcto acople entre la pieza de unión y la cavidad receptora.

2.5.1 Montaje

Durante esta etapa, el ensamblaje del panel se realizó mediante dos procedimientos. El primero consistió en armar el panel en posición vertical, sin utilizar elementos externos para fijar la solera inferior al piso,

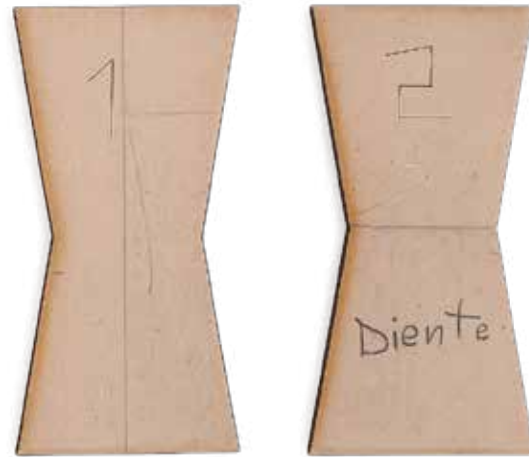
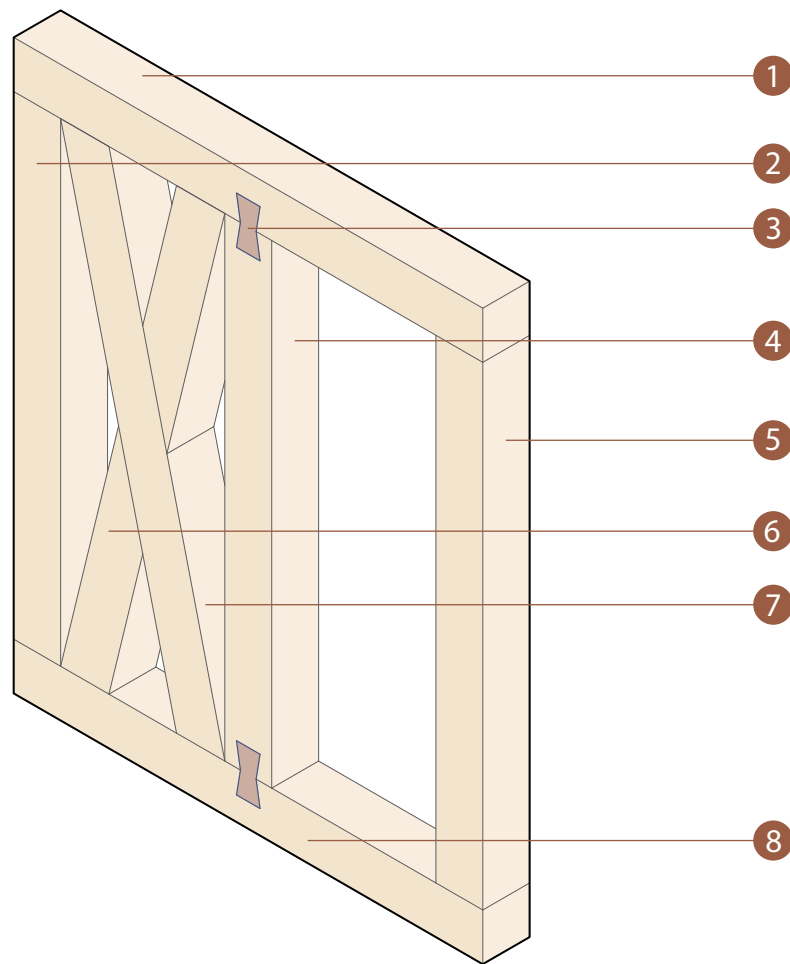


Figura 46. Fotografía de los moldes para la fabricación de llave representada por la figura A y B. Elaboración propia



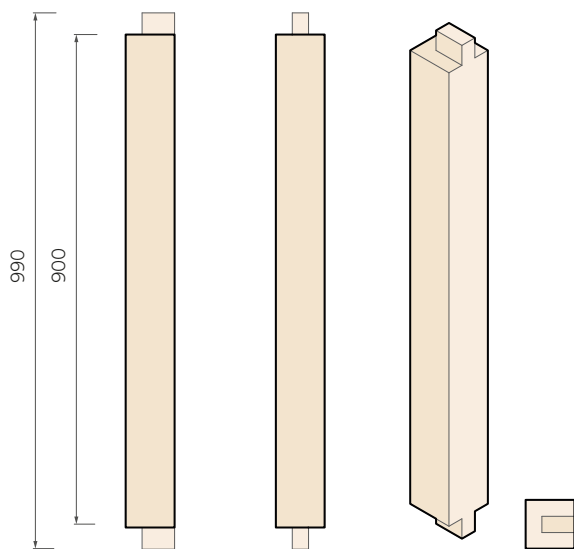
Figura 47. Fotografía de algunas de las herramientas utilizadas en laboratorio. Elaboración propia



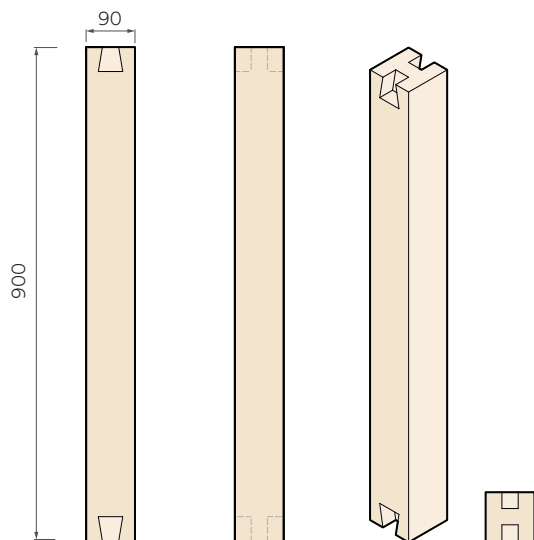
- | | | |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1 Solera superior | 4 Poste Central | 7 Diagonal B |
| 2 Poste A | 5 Poste B | 8 Solera inferior |
| 3 Pieza de unión | 6 Diagonal A | |

Figura 48. Diagrama axonométrico del primer prototipo. Elaboración propia.

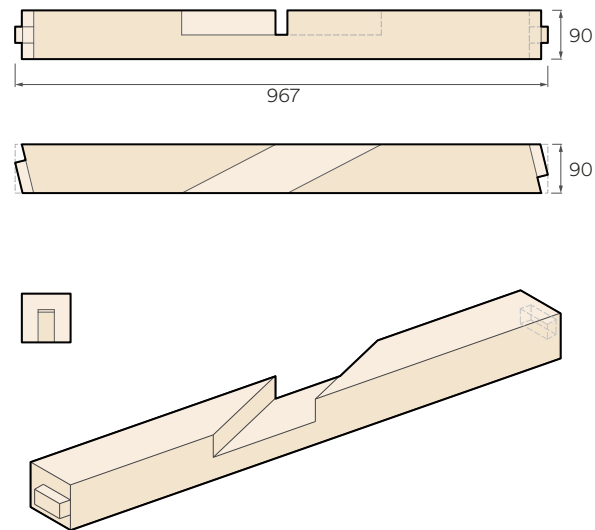
2 5 POSTE A Y POSTE B



4 POSTE CENTRAL



6 7 DIAGONAL A Y B



1 8 SOLERA SUPERIOR E INFERIOR

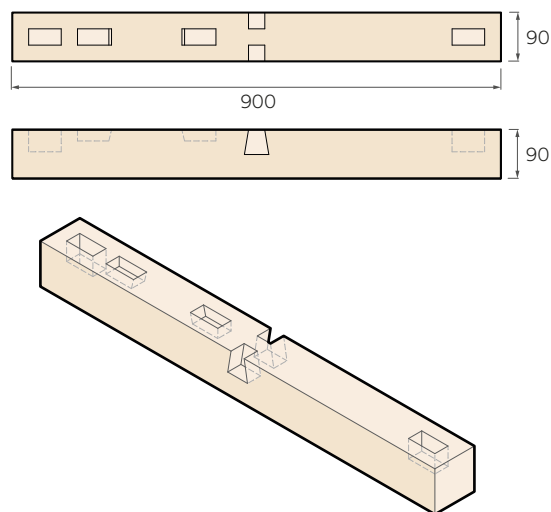


Figura 49. Despiece del primer prototipo. Elaboración propia.

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Pino Oregón (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)
Tipo	Nacional
Tratamiento	Seca cepillada
Dureza Monnin	blanda
Densidad aproximada	470–490 kg/m ³
Contenido de humedad	< 20%

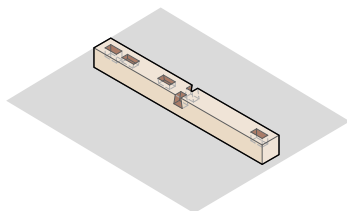
Tabla 03. Características del Pino Oregón G2, basado en el informe técnico 196 (INFOR, 2013)

ya que la escala reducida de los componentes no lo requería. En primer lugar, se posicionó la solera inferior a ras de piso. Posteriormente, se montaron los postes exteriores en las cajas correspondientes de la solera. Luego, se ensamblaron las diagonales entre sí mediante uniones de doble madera y se instalaron de forma paralela en sus respectivas cajas ubicadas en la solera inferior. Esta operación requirió menor esfuerzo, debido a que la gravedad favoreció el encaje de los elementos. A continuación, se instaló la solera superior, procurando el calce simultáneo con los postes exteriores y las diagonales. Esta etapa demandó mayor precisión y esfuerzo, debido a que las espigas de distintos elementos debían ingresar al mismo tiempo en sus respectivas cajas. Finalmente, el poste central fue incorporado lateralmente junto con sus piezas de unión.

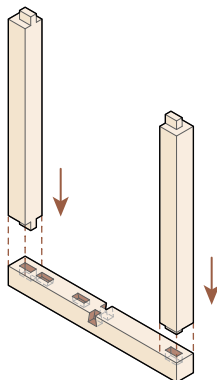
El segundo procedimiento se realizó con el panel acostado. En términos generales, la secuencia de montaje se desarrolló de manera similar al procedimiento vertical hasta la incorporación del poste central. En esta etapa, fue necesario levantar el panel para instalar la pieza de llave correspondiente a la cara opuesta. Sin embargo, se observó que, aun contando con una sola pieza de unión instalada, el nivel de firmeza alcanzado por el encuentro permitió levantar el panel sin que el poste central se desplazara de su posición.

SECUENCIA DE MONTAJE

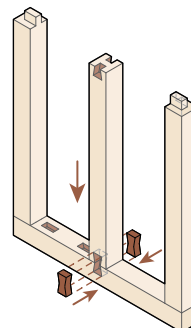
Paso 1



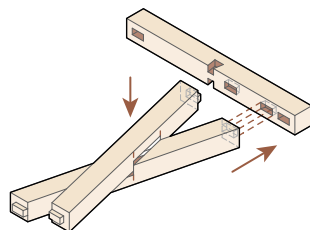
Paso 2



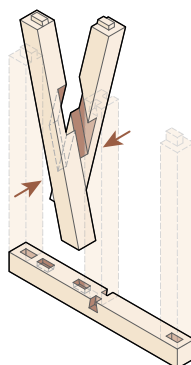
Paso 3



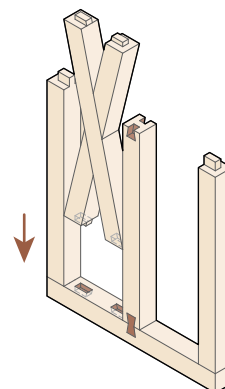
Paso 4



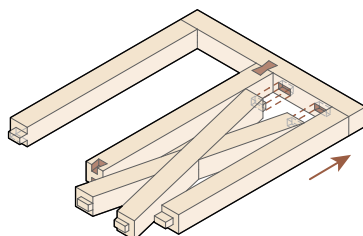
Paso 4 ALT



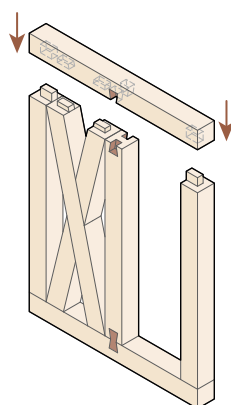
Paso 5 ALT



Paso 5



Paso 6



Paso Final

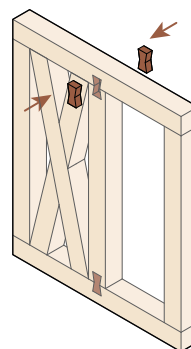


Figura 50. Secuencia de montaje del primer prototipo. Elaboración propia

Se recomienda considerar un montaje combinado, alternando operaciones en posición horizontal y vertical según la comodidad de los operadores, las herramientas disponibles y las condiciones del terreno donde se realice el ensamblaje. Esta estrategia permite adaptar el proceso de montaje a distintos escenarios, manteniendo la precisión requerida en las uniones y reduciendo el esfuerzo necesario durante el armado.

2.5.2 Desmontaje

Una vez armado el panel, se verificó la posibilidad de desmontar los componentes sin recurrir a procesos destructivos. Para ello, se ejecutó la secuencia inversa al montaje, iniciando con el panel en posición vertical, retirando únicamente el poste central mediante desplazamiento lateral. Posteriormente, el panel fue dispuesto en posición horizontal para continuar con el desensamblaje de los demás elementos. Esta decisión permitió reducir el esfuerzo requerido durante la separación de las piezas y controlar de mejor manera la extracción de postes, soleras y diagonales.

La prueba permitió comprobar que el sistema presenta un grado de reversibilidad compatible con operaciones de desmontaje, aunque también evidenció que la posición del panel y la secuencia de extracción influyen directamente en la facilidad del proceso. En este sentido, el desmontaje no depende únicamente del tipo de unión, sino también de la planificación del orden de armado y desarmado del conjunto.

2.5.3 Alzado

Este procedimiento permitió observar cómo las uniones de llave contribuían a restringir el desplazamiento entre las piezas, manteniendo la continuidad del conjunto durante el movimiento de alzado. La prueba evidenció que el sistema puede comportarse como una unidad ensamblada, permitiendo su levantamiento e instalación sin que las piezas se separen o pierdan su posición original. En este sentido, la llave no solo cumple una función de unión entre elementos, sino que también aporta estabilidad durante la manipulación del panel completo.

2.5.4 Errores y desviaciones

Durante el proceso se identificaron desviaciones asociadas tanto a la preparación manual de las piezas como a las condiciones propias del material. Uno de los principales problemas observados correspondió a la deformación longitudinal y torsional de la madera, especialmente en piezas que presentaban alabeos o pérdida de escuadría entre sus caras. Estas variaciones afectaron directamente el calce entre postes, soleras y diagonales, generando pequeñas luces, desajustes e interferencias durante el ensamblaje.

Esta condición permitió reconocer que la precisión del sistema no depende únicamente del mecanizado de las uniones, sino también de la estabilidad dimensional de las piezas antes y durante el proceso de fabricación. Asimismo, se observó la importancia de que las superficies de contacto se mantengan planas y escuadradas, ya que de ellas depende el ajuste geométrico entre componentes y una transmisión de esfuerzos más continua, evitando concentraciones puntuales de carga en zonas específicas o en las piezas de unión.

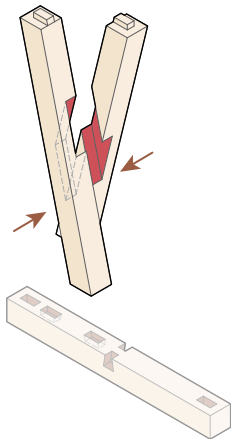


Figura 51. Detalles y posibles desviaciones del primer prototipo. Elaboración propia

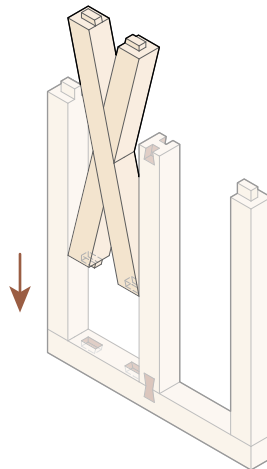
2.5.5 Aprendizaje para el prototipo final

Durante el montaje del prototipo exploratorio se identificó que una de las principales dificultades del sistema correspondía al calce simultáneo entre las espigas de las diagonales y las espigas de los postes exteriores. Al instalar la solera superior, todos estos elementos debían ingresar al mismo tiempo en sus respectivas cajas, lo que exigía aplicar mayor esfuerzo mediante mazo para lograr el ajuste completo del conjunto. Además, se concluyó que cuantos más encuentros se debían coordinar, mayor era la probabilidad de error encontrado en al menos uno de ellos, Si bien las espigas de las diagonales restringían el desplazamiento de los elementos, existía la obligación geométrica de encajar las dos diagonales simultáneamente, debido a que el encuentro de doble madera y las espigas suponían unas restricciones incompatibles a la hora de montar las diagonales sobre las soleras.

Unión diagonales



Unión Diagonales sobre solera inferior



Unión solera superior sobre diagonales

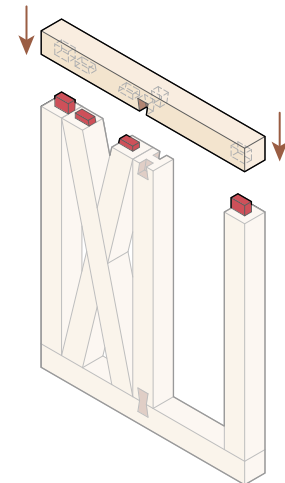


Figura 52. Problemas de montaje para las cajas con espiga en las diagonales. Elaboración propia

Otro problema encontrado en la etapa de desmontaje fue retirar la llave, ya que al quitar el poste central, dos de estas llaves se mantuvieron conectadas a la solera y dado a que su geometría se encuentra en parte conectada a la solera, se hacía imposible quitarlas con un mazo, por lo que se optó por removerlas con un movimiento zigzag liberando progresivamente la pieza con poca fuerza.

Si bien la fabricación de las cajas para la llave no representó un gran desafío, desde esta etapa se evidenció la necesidad de trabajar con una elevada precisión dimensional en cada una de las “medias cajas”. Se observó que pequeños desfases en el eje Z podían permitir el ensamble de la pieza de llave, pero generar simultáneamente una pequeña separación entre el poste y la solera. Esta condición dejaría en evidencia que la pieza de unión estaría sometida a la mayor parte de las cargas de compresión, alterando el comportamiento estructural esperado del conjunto.

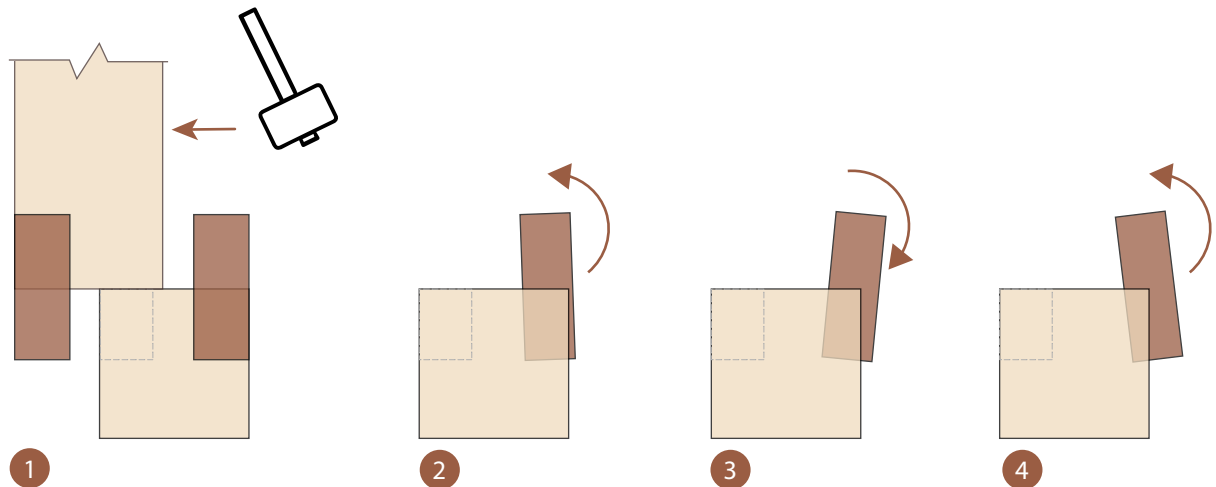
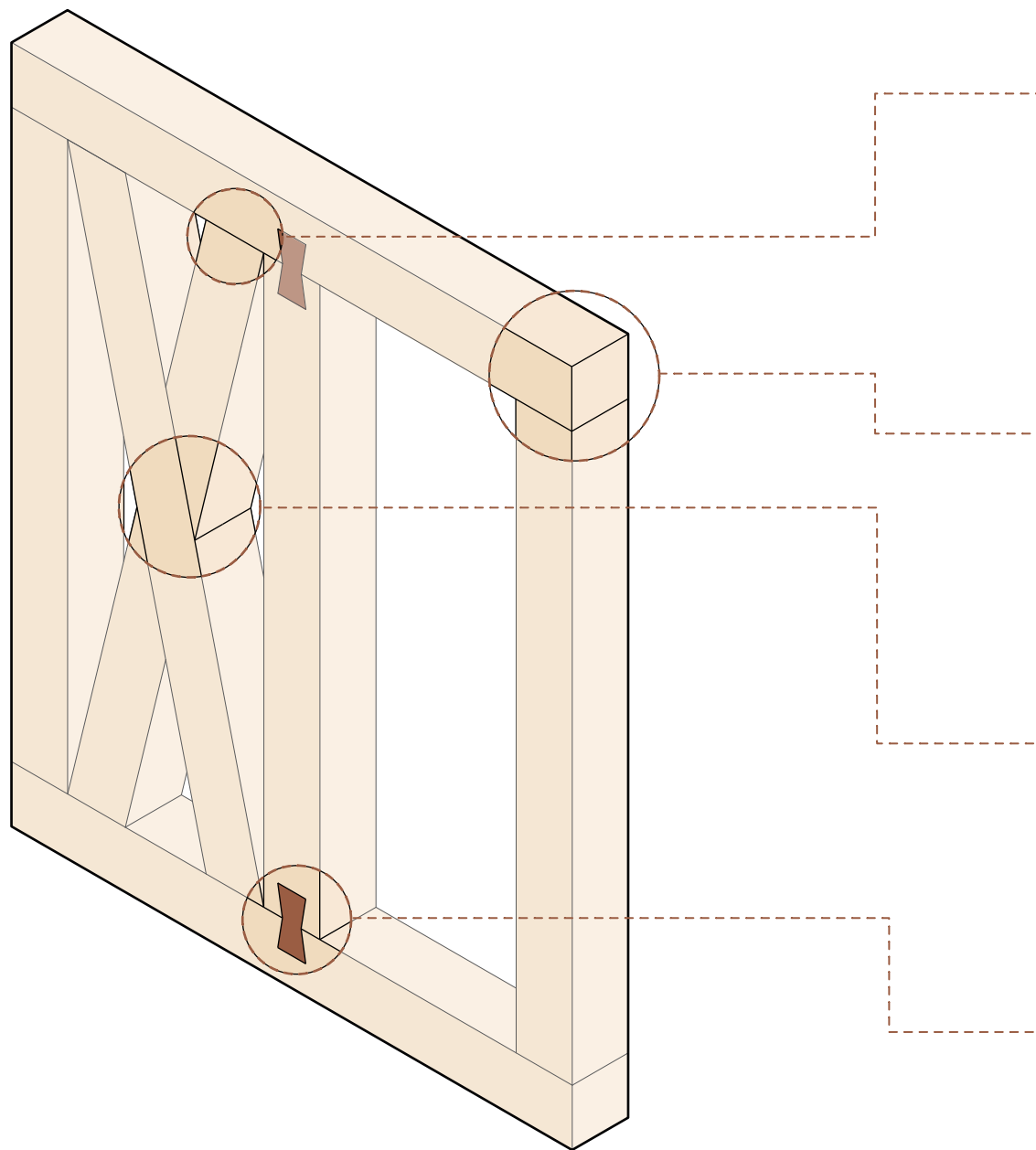
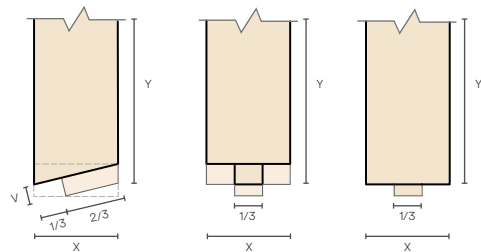


Figura 53. Diagrama demostrando la secuencia de desarmado de la llave. Elaboración propia

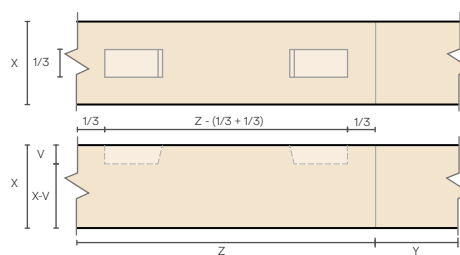


Diagonal - Solera

Macho



Hembra



Dificultad para armar

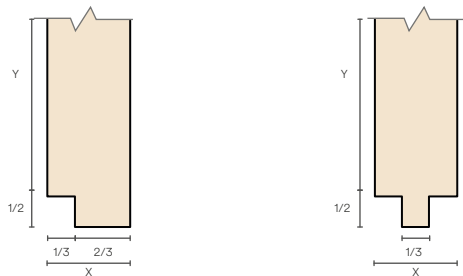


Importancia de holgura

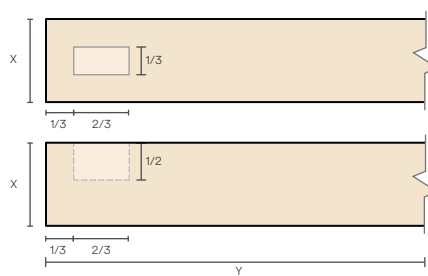


Poste extremo - solera

Macho



Hembra



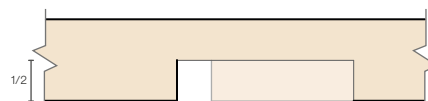
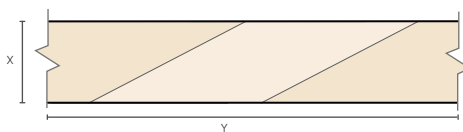
Dificultad para armar



Importancia de holgura



Diagonal - Diagonal



Dificultad para armar

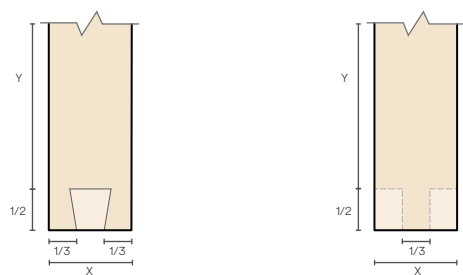


Importancia de holgura

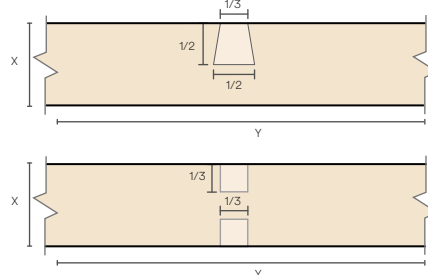


Poste interior - solera

Hembra



Hembra



Dificultad para armar



Importancia de holgura



Figura 54. Uniones utilizadas para el primer prototipo. Elaboración propia

2.6 PRUEBAS DE MECANIZADO

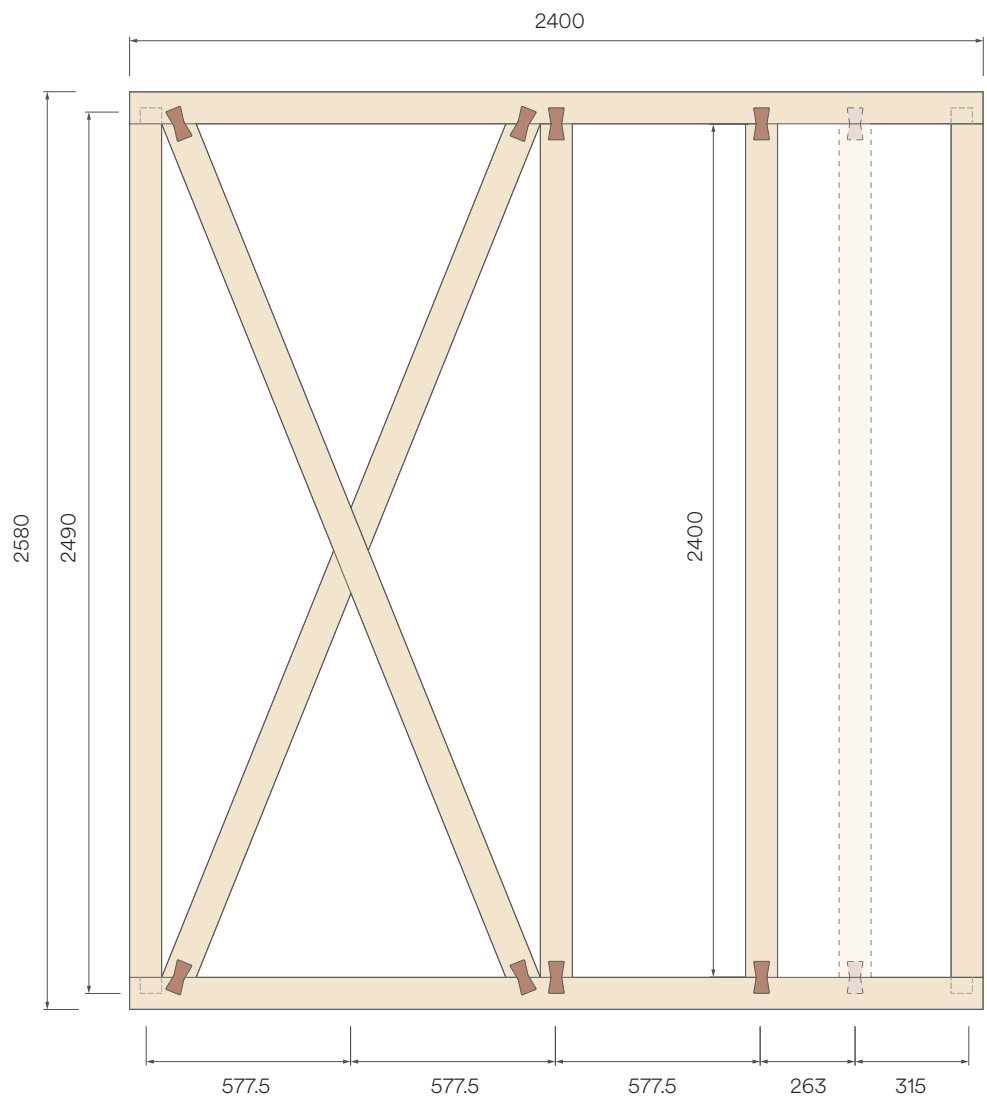


Figura 55. Elevación del prototipo final del panel. Elaboración propia

El objetivo del prototipo final es evaluar la viabilidad técnica de fabricación y armado del panel, considerando el registro de los tiempos asociados a los procesos de fabricación, medición y montaje. Asimismo, se busca identificar y documentar los errores, desviaciones dimensionales y holguras que puedan presentarse durante el proceso, con el fin de evaluar el desempeño del sistema y sus posibilidades de ajuste.

El prototipo se conformó a partir de ocho piezas longitudinales de pino radiata. Antes del mecanizado, estas presentaban ligeras deformaciones asociadas a variaciones de humedad, secado y tensiones internas propias de la madera. Se registraron alabeos de entre 5 y 15 mm, medidos como diferencia de altura entre esquinas opuestas respecto de una superficie plana de referencia. Esta deformación resulta especialmente relevante para el desarrollo del prototipo, ya que puede comprometer el posicionamiento de las piezas durante el mecanizado y afectar directamente el calce de las uniones carpinteras.

A partir de esta revisión, se seleccionaron preferentemente las piezas con menor alabeo para los elementos donde la precisión del calce resultaba más crítica. En cambio, las piezas con mayor curvatura longitudinal fueron destinadas a la fabricación de postes, ya que su ensamblaje depende principalmente de la geometría de los extremos y de su relación con las cajas mecanizadas en las soleras. De esta manera, una curvatura leve a lo largo de la pieza podía ser asumible durante el montaje sin afectar directamente el calce de las uniones.

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Pino radiata
Tipo	Nacional
Tratamiento	Seca cepillada
Dureza Monnin	Blanda
Densidad aproximada	458 kg/m ³
Contenido de humedad	< 20 %

Tabla 04. Características del Pino Radiata G2, basado en el informe técnico 209 (INFOR, 2016)

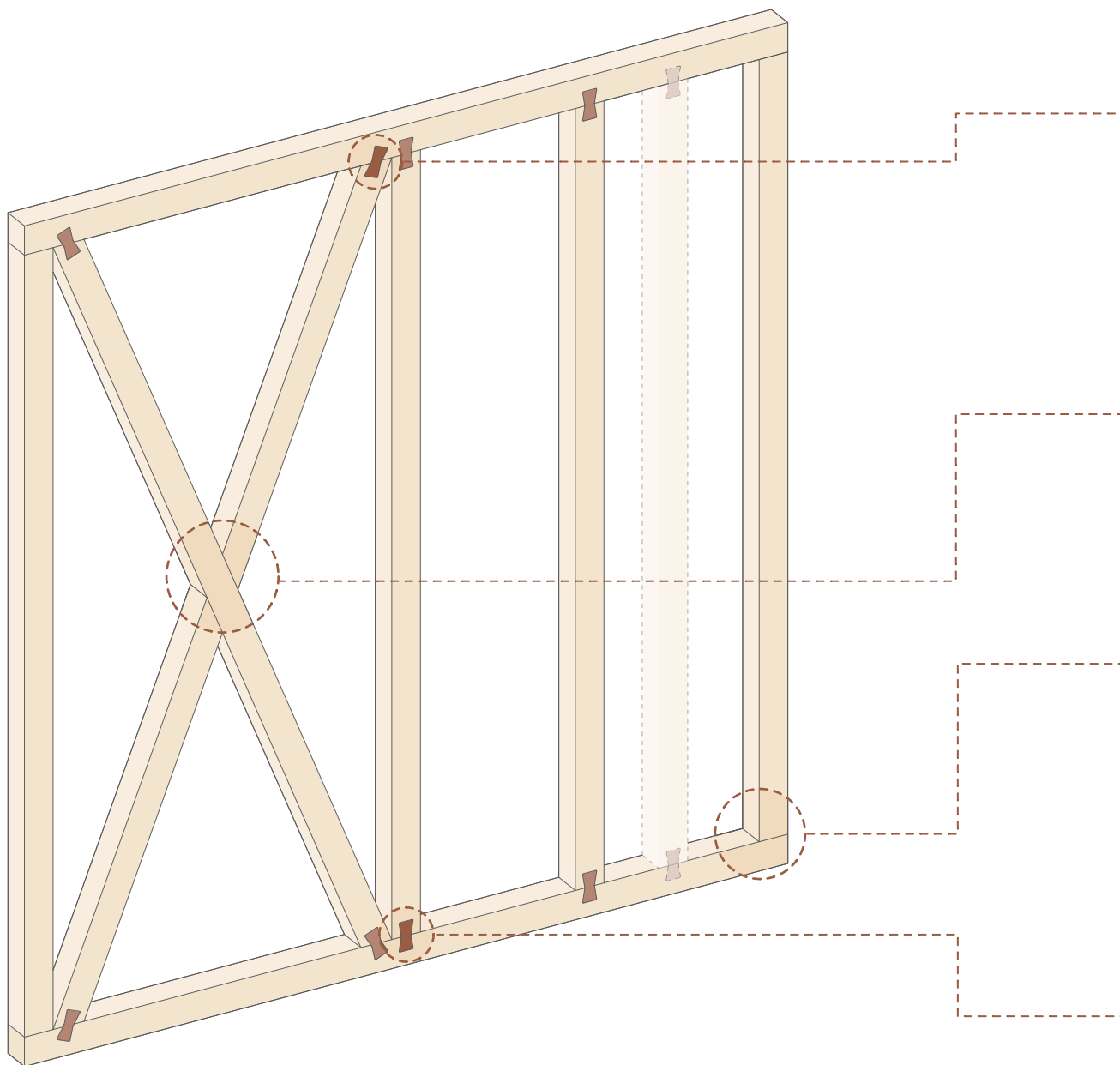
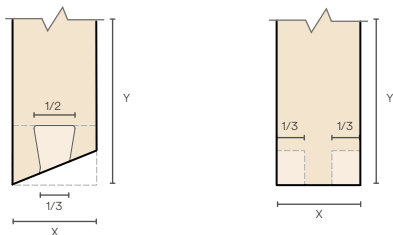


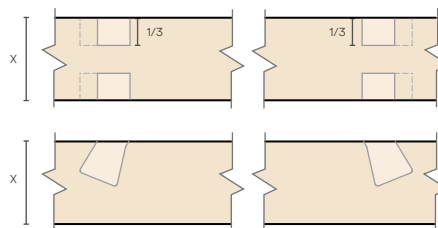
Figura 56. Detalle de las uniones mecanizadas del prototipo final. Elaboración propia

Diagonal - Solera

Hembra A



Hembra B



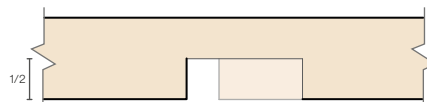
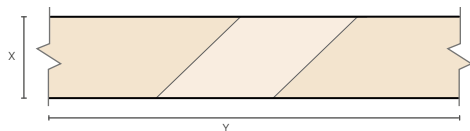
Dificultad para armar



Importancia de holgura



Diagonal - Diagonal



Dificultad para armar

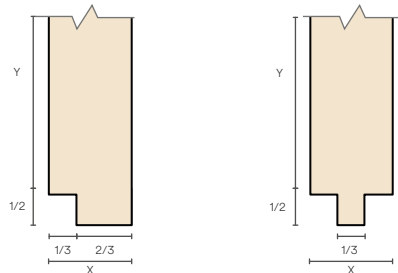


Importancia de holgura

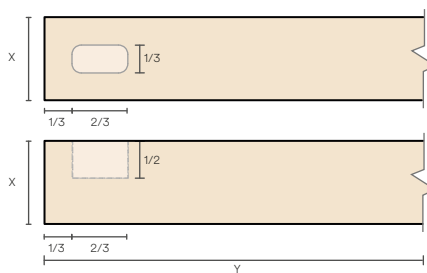


Poste extremo - solera

Macho



Hembra



Dificultad para armar

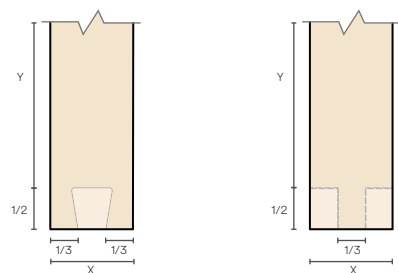


Importancia de holgura

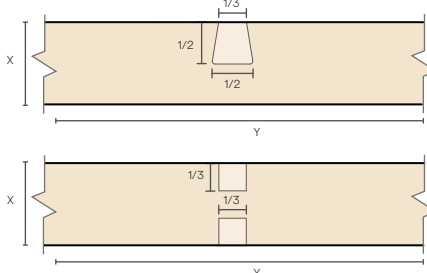


Poste interior - solera

Hembra A



Hembra B



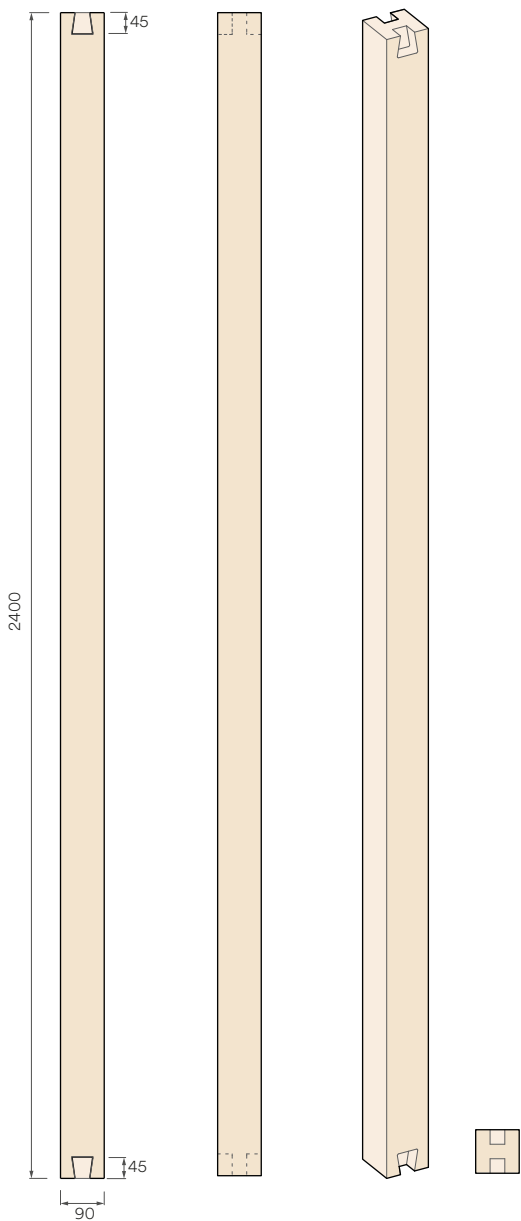
Dificultad para armar



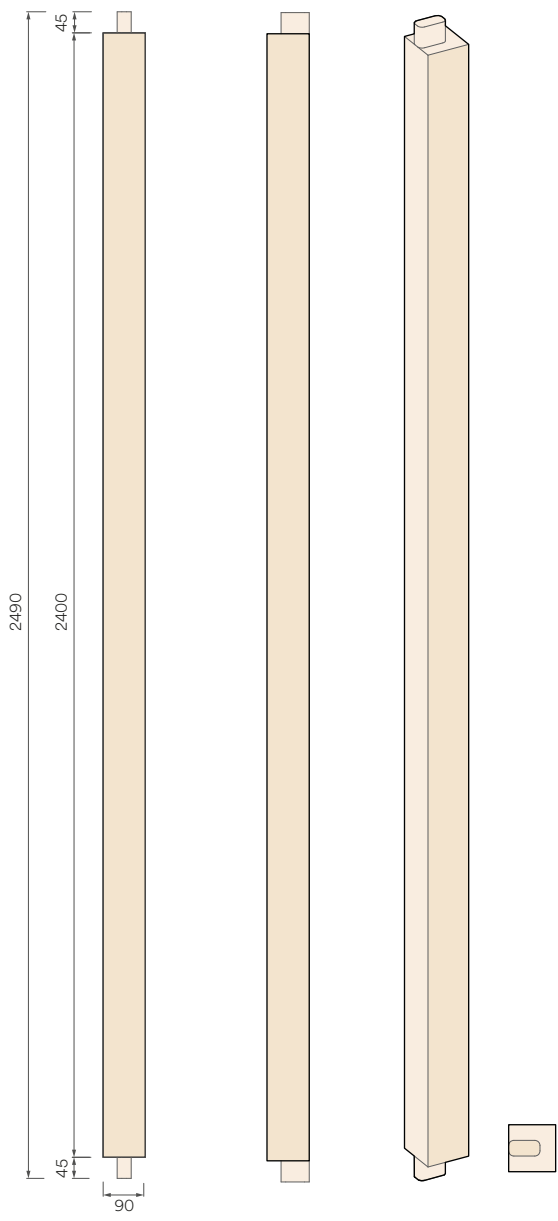
Importancia de holgura



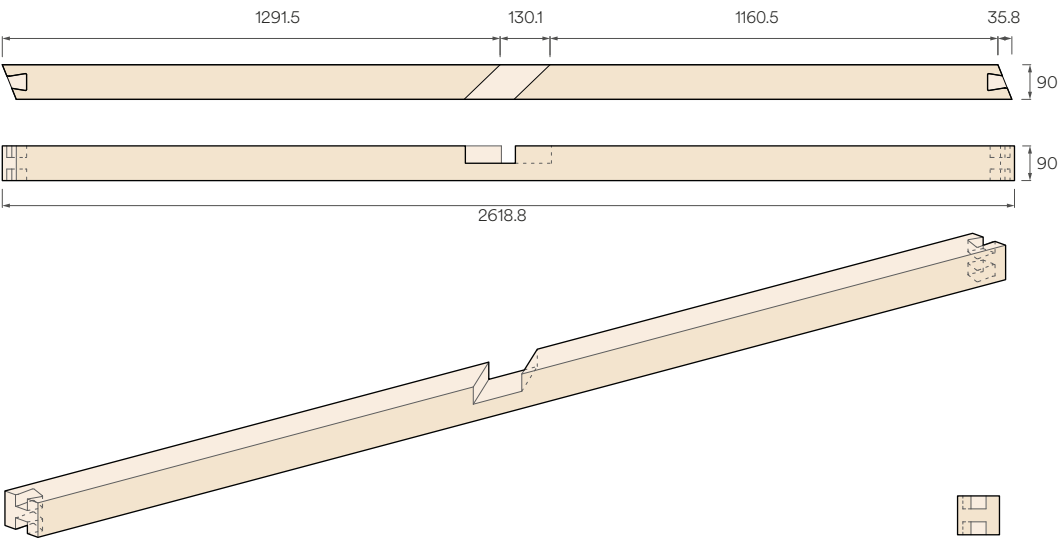
POSTE CENTRAL



POSTE EXTERIOR



DIAGONALES



SOLERA SUPERIOR E INFERIOR

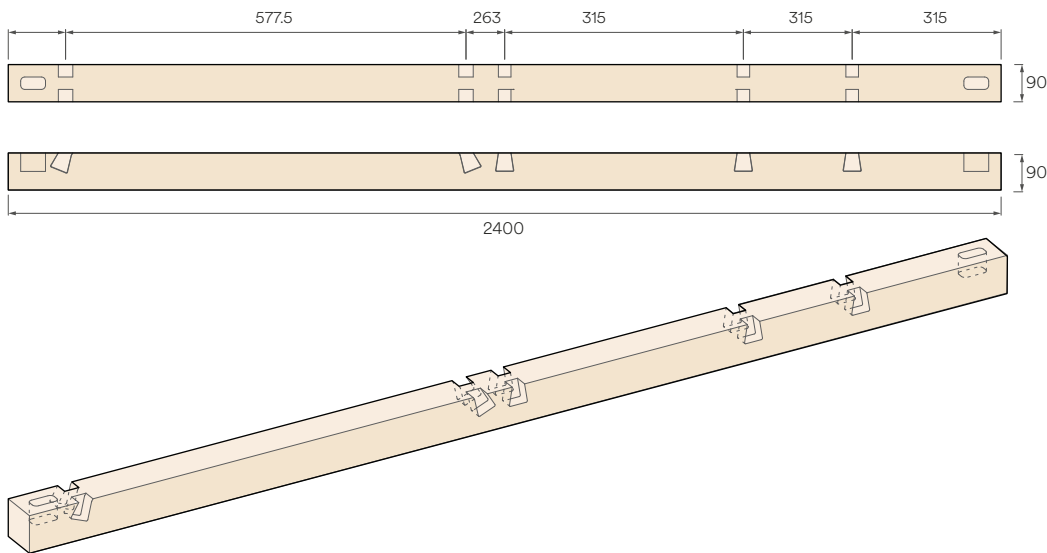


Figura 57. Despiece de las piezas del prototipo final. Elaboración propia

2.6.1 Flujo de trabajo

Para comenzar el trabajo de mecanizado, primero se desarrolla un modelo digital de referencia en Rhinoceros 3D, donde se dibuja la geometría de la pieza con el fin de visualizar sus dimensiones, proporciones y posición dentro de un plano de referencia común. Este modelo inicial funciona como base para el desarrollo posterior de las trayectorias y estrategias de fabricación.

Posteriormente, la geometría es reconstruida en Grasshopper mediante una definición paramétrica, donde se configuran variables asociadas a dimensiones, tolerancias y modificaciones geométricas. Esta metodología permite ajustar rápidamente aspectos del diseño sin necesidad de remodelar cada pieza manualmente, facilitando iteraciones constantes durante el proceso de prueba y error.

Una vez definida la geometría final, los planos y trayectorias de referencia son enviados al plugin KUKA|prc, donde se simula el comportamiento del brazo robótico dentro de un entorno virtual. Esta etapa resulta fundamental para verificar alcances, orientaciones y posibles colisiones, tanto del robot consigo mismo como con la pieza a mecanizar o la superficie de trabajo. La simulación permite además revisar la continuidad de las trayectorias, los ángulos de aproximación y la viabilidad general del mecanizado antes de ejecutar el proceso real.

Finalmente, se incorporan las coordenadas correspondientes al sistema de referencia físico del robot dentro de la configuración de KUKA|prc, permitiendo relacionar el entorno digital con la posición real de trabajo. Posteriormente, el programa es exportado como un archivo “.src”, transferido mediante un dispositivo USB al SmartPAD, dispositivo encargado de ejecutar el robot a través de la interfaz de comandos del equipo.

2.6.2 Espacio, herramientas y equipo de trabajo

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Construcción y Manufactura Robotizada de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín, utilizando un brazo robótico KUKA KR 210 R3100-2 C. En el extremo de la punta del robot se instaló una fresa de tres filos

de 10 mm de diámetro. Los mecanizados se desarrollaron sobre una mesa fija de cuatro apoyos, elevada 90 cm sobre el nivel del suelo. Las piezas fueron aseguradas mediante tres a cuatro prensas y referenciadas contra un tope longitudinal metálico fijado a la mesa, ubicando el punto de referencia (0, 0, 0) a 10 cm del borde de dicho tope. Esta condición resultó fundamental para garantizar la repetibilidad del proceso y mantener la precisión dimensional entre distintas pruebas. Asimismo, cuando la geometría o profundidad del mecanizado lo exigía, se incorporaron piezas de sacrificio con el fin de evitar interferencias con la superficie de trabajo y permitir el recorrido completo de la herramienta.

Durante la ejecución de los programas, se mantuvo una distancia de seguridad aproximada de tres metros respecto del área de mecanizado. Esta medida se adoptó con el fin de proteger al operador frente a posibles desprendimientos de material. El control del proceso se realizó mediante el SmartPAD en modo manual, permitiendo supervisar el comportamiento del robot y verificar el correcto funcionamiento de las trayectorias programadas. Esta modalidad permitió detener inmediatamente la operación ante una posible colisión con la mesa, los elementos de fijación o la propia pieza, así como reaccionar frente a eventuales fallas del material que pudieran alterar el recorrido previsto de la herramienta.



Figura 58. Flujo de trabajo para la elaboración de los mecanizados. Elaboración propia

Una vez finalizado el respectivo mecanizado, se procede a retirar cuidadosamente la pieza resultante de la mesa de trabajo, eliminando las secciones remanentes destinadas a la fijación y cualquier elemento de sacrificio utilizado durante el proceso. Posteriormente, la pieza es inspeccionada visualmente con el fin de identificar posibles defectos asociados al mecanizado, tales como astillamientos, desviaciones geométricas o imperfecciones superficiales generadas por la trayectoria de la herramienta. Finalmente, el elemento obtenido es sometido a las mediciones, ensayos o pruebas correspondientes según los objetivos específicos de cada experimento.

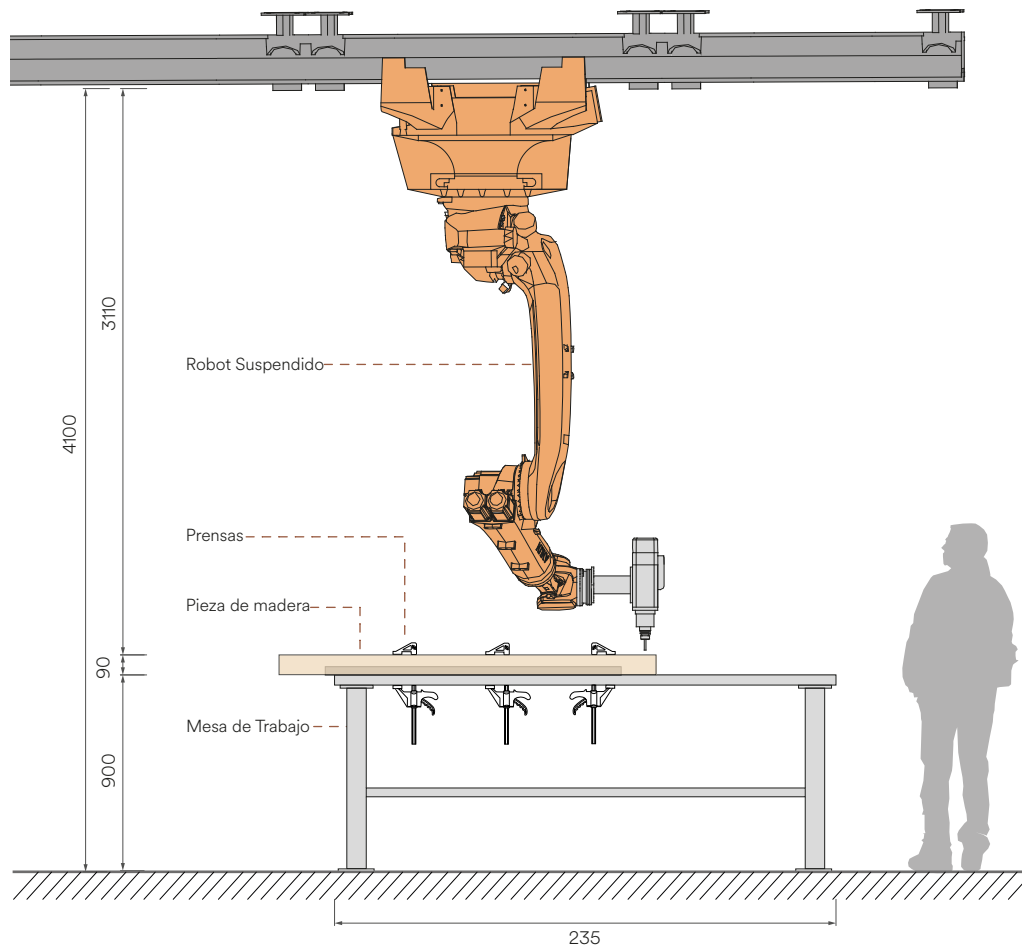


Figura 59. Elevación del espacio de trabajo de laboratorio. Elaboración propia

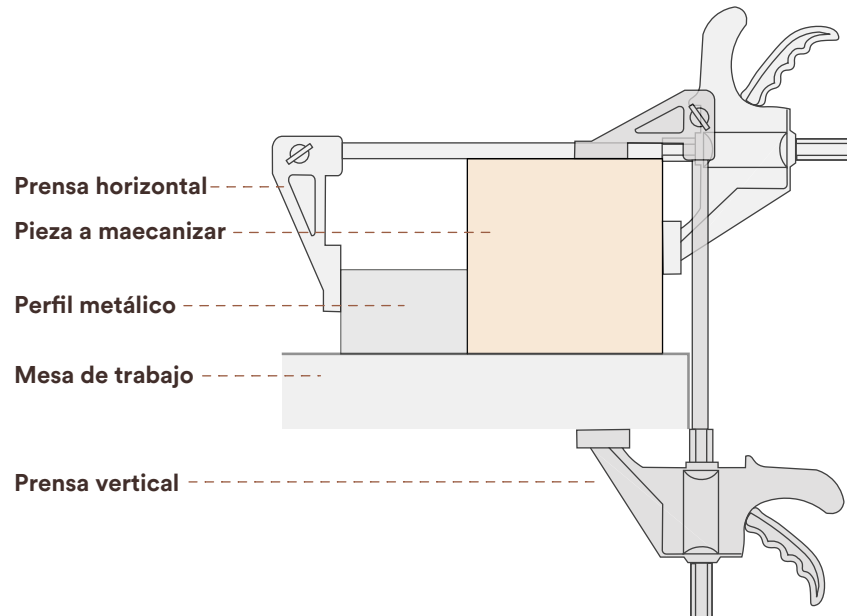


Figura 60. Elevación lateral de la pieza a mecanizar. Elaboración propia

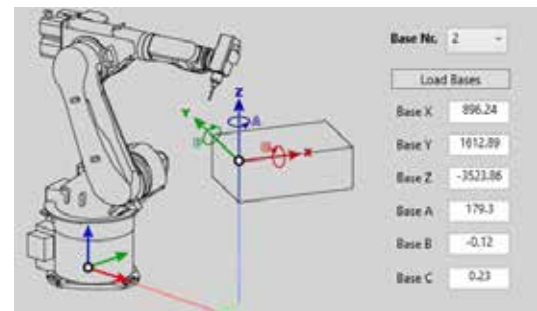
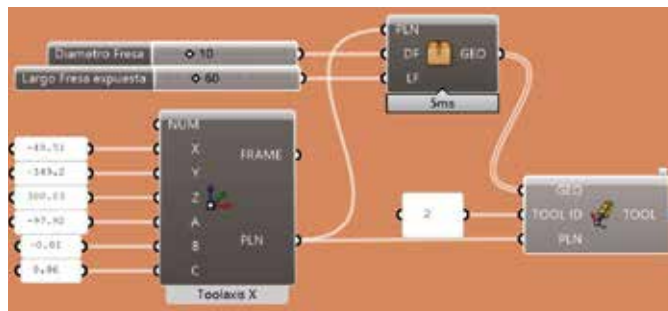


Figura 61. Parámetros de la fresa y parámetros de la base o punto de origen para el robot. Elaboración propia

2.6.3 Diseño para el mecanizado

Una vez predefinidas las geometrías y encajes entre elementos, se desarrolla el diseño digital de las uniones. Durante esta etapa, las propuestas deben ajustarse a distintos parámetros asociados al mecanizado con fresa, así como a las capacidades y restricciones que ofrece la herramienta utilizada.

Uno de los principales condicionantes corresponde al radio de la herramienta de corte, ya que este define los límites geométricos que pueden alcanzarse durante el mecanizado. Considerar esta variable resulta fundamental para garantizar un correcto encaje entre los elementos y evitar la aparición de zonas inaccesibles para la herramienta o interferencias durante el ensamblaje (Figura 62).

Finalmente, se estudian las trayectorias de mecanizado y los ángulos de aproximación de la herramienta, entendiendo que estos determinan tanto la viabilidad del corte como la precisión del resultado final. Por esta razón, las geometrías propuestas no responden únicamente a criterios estructurales, sino también a las limitaciones operativas del robot, buscando compatibilizar desempeño mecánico, factibilidad de fabricación y precisión dimensional.

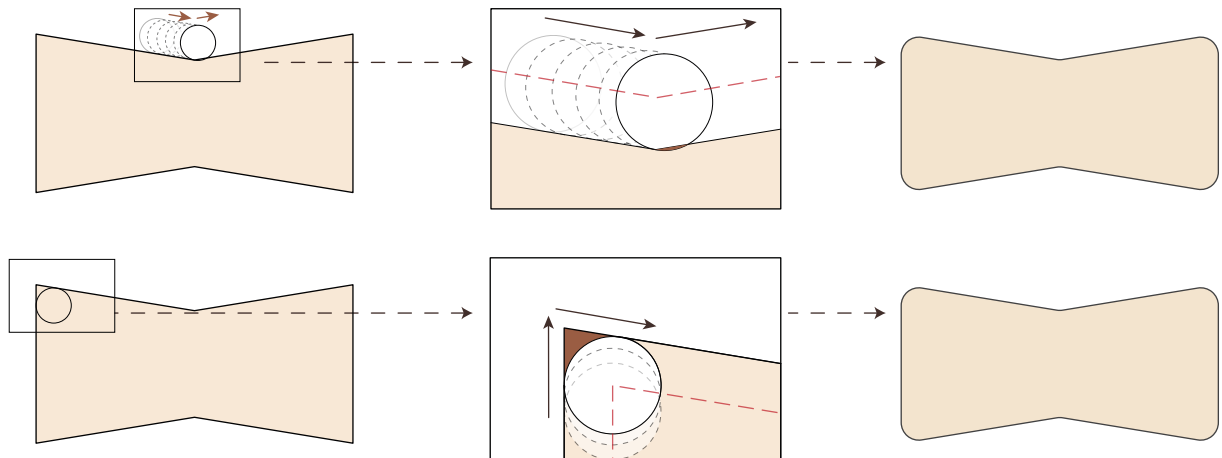


Figura 62. Adaptación del diseño tradicional. Elaboración propia

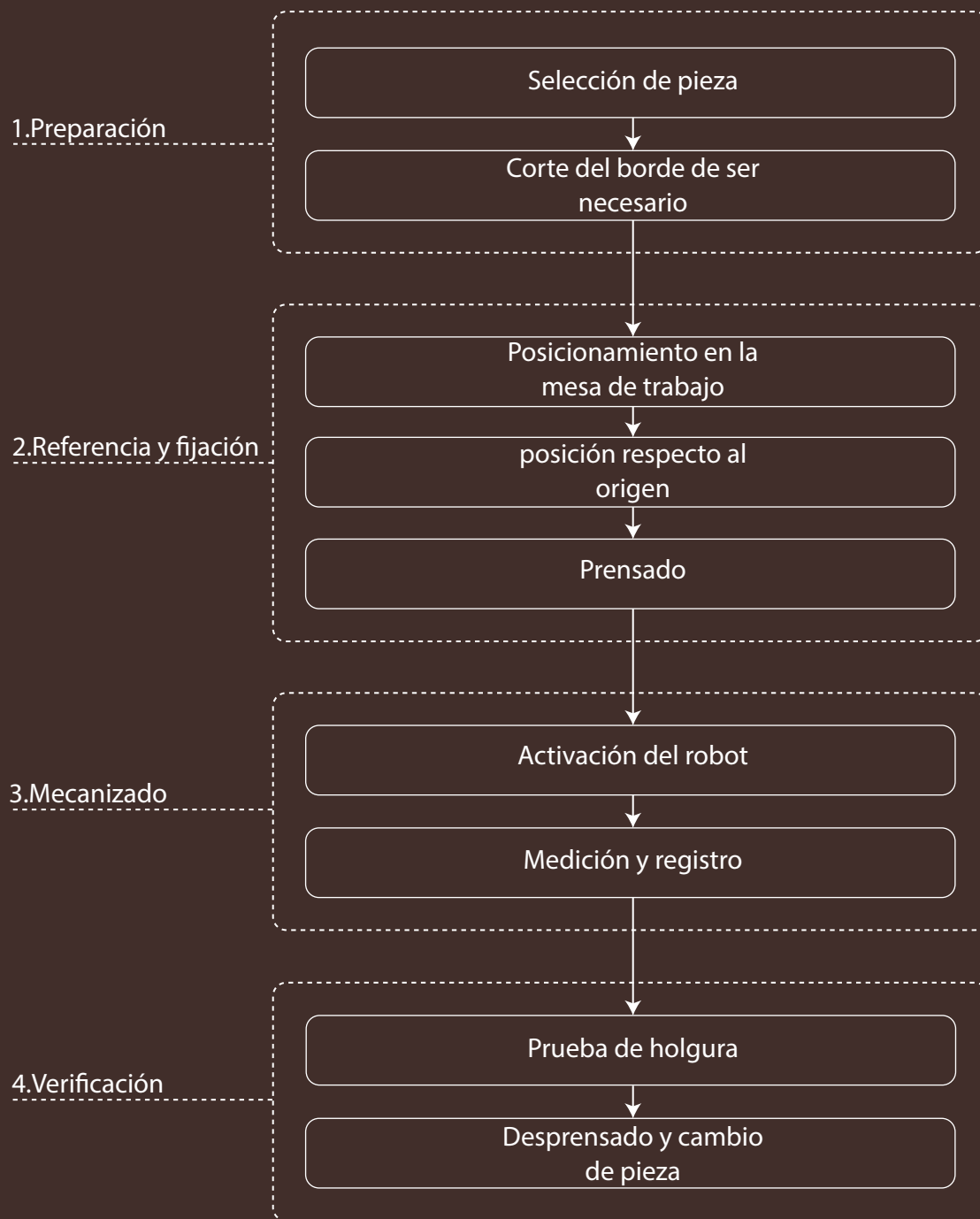


Fig. 63. Flujo de trabajo para mecanizar las piezas. Elaboración propia

2.6.4 Primera prueba de mecanizado para la llave

La comprobación de las tolerancias y holguras constituye un aspecto fundamental para la validación de la unión propuesta. En este caso, el primer ensayo se centró en la llave de roble, buscando evaluar las posibles irregularidades geométricas generadas durante el proceso de mecanizado.

Es importante señalar que, durante las pruebas de mecanizado, fue necesario reservar una sección de aproximadamente de 40-60 cm de longitud para la fijación de la pieza a la mesa de trabajo. Esta zona fue prensada contra la mesa de trabajo y alineada con el elemento metálico de referencia, con el fin de mantener la pieza estable y a plomo durante la operación del robot. Debido a esta condición, dicha sección no fue considerada dentro del área útil de mecanizado. En consecuencia, la longitud disponible para fabricar piezas no correspondió a la totalidad del elemento base, sino únicamente al tramo libre posterior a la zona de fijación.

Para la fabricación de esta pieza se utilizaron elementos longitudinales de roble con una sección de 90 × 30 mm. La longitud de estos elementos permitía proyectar y mecanizar múltiples piezas

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Roble (Nothofagus obliqua)
Tipo	Nativa
Tratamiento	Seca cepillada
Dureza Monnin	Semidura 6.0
Resistencia a la compresión	580 kg/cm ²
Resistencia a la flexión estática	1070 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	115.000 kg/cm ²
Densidad aproximada	600 kg/m ³
Contenido de humedad	12 %

Tabla 05. Ficha técnica del roble usado para las pruebas. Fuente: Maderas Tranapunte SPA

de llave a lo largo de una misma pieza base, optimizando el uso del material y facilitando la realización de ensayos de mecanizado. Sin embargo, para esta primera prueba se optó por mecanizar únicamente una pieza, con el fin de evaluar su comportamiento frente a las trayectorias de mecanizado.

Con el fin de evitar que la pieza resultante se desplazara o perdiera su posición una vez alcanzada la profundidad máxima de corte, se diseñaron trayectorias finales que conservaron una pequeña entalladura (5) paralela al lado menor de la sección. Esta estrategia permitió mantener la fijación de la pieza resultante al elemento base durante el mecanizado, aportando mayor estabilidad al proceso y reduciendo el riesgo de movimientos que pudieran afectar la precisión del resultado final.

De manera complementaria, se incorporó un elemento de sacrificio bajo la pieza a mecanizar, destinado a ser desgastado durante el proceso. Esta solución permitió prolongar el recorrido de la herramienta algunos milímetros por debajo de la altura del elemento principal, asegurando que

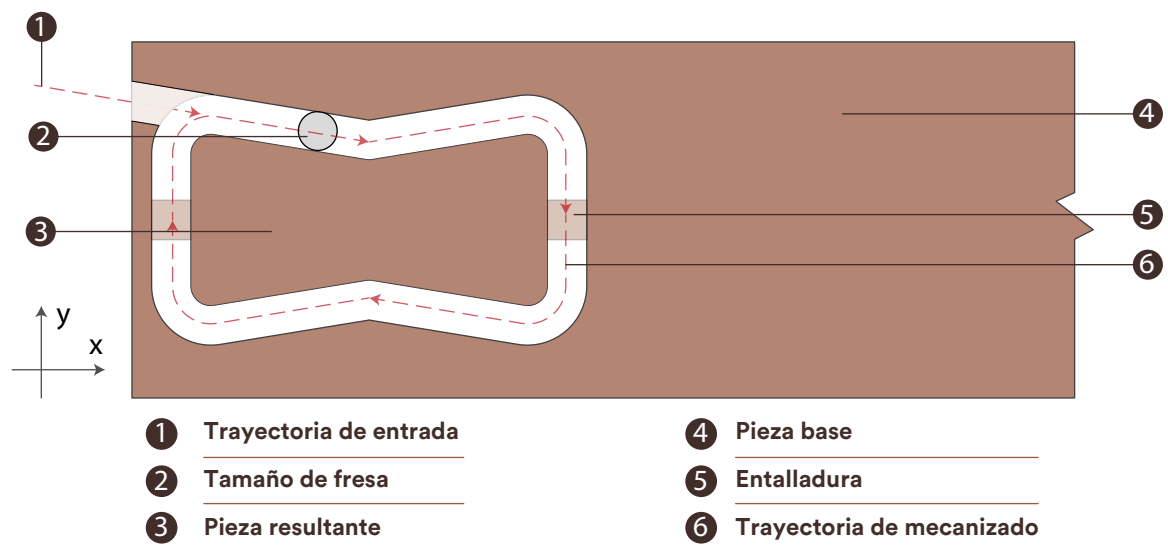


Figura 64. Vista cenital, trayectoria de mecanizado para prueba N°1. Elaboración propia

REGISTRO
FOTOGRAFICO
DE PRUEBA
Nº1 FRENTE Y
REVERSO



Cara posterior



Cara frontal



Vista 1



Vista 2

el desbaste atravesara completamente la pieza. Considerando estas condiciones de fabricación, para la primera prueba de la llave se definieron los parámetros de mecanizado indicados en la tabla 06.

Como resultado no esperado del ensayo, se observó una distorsión en una de las aristas interiores de la pieza. Este comportamiento se atribuye a un leve desplazamiento lateral asociado a las fuerzas ejercidas por la fresa al alcanzar mayores profundidades de corte durante la fase de mecanizado. Esta observación fue considerada para la segunda prueba, donde se implementaron ajustes destinados a mejorar la estabilidad de la pieza y la precisión del resultado final.

2.6.5 Segunda prueba de mecanizado para llave

Para la segunda prueba, se modificó la definición paramétrica desarrollada en Grasshopper con el objetivo de mecanizar múltiples piezas dentro de una misma operación, permitiendo evaluar el comportamiento general del proceso con varias unidades. No obstante, para esta etapa se optó por limitar el ensayo a tres piezas simultáneas. Esta decisión tuvo como finalidad verificar el correcto funcionamiento de las trayectorias programadas, la estabilidad de las piezas durante el mecanizado y la repetibilidad del proceso. Asimismo, trabajar con un número reducido de

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Roble (Nothofagus obliqua)
Revoluciones por minuto de la fresa (RPM)	30 000
Velocidad de mecanizado (m/s)	0,025
Sección del elemento (mm)	90 × 30
Profundidad pasada (mm)	4
Cantidad de pasadas	8
Profundidad total de pasada (mm)	32
Holgura (mm)	0,4

Tabla 06. Parámetros de mecanizado para elementos en Roble

piezas permitió supervisar adecuadamente la ejecución del programa y detener la operación en caso de detectar errores, colisiones o desviaciones que pudieran comprometer los resultados del ensayo.

Como resultado de las observaciones obtenidas en la primera prueba, se modificó la estrategia de aproximación de la herramienta. Para ello, se reubicó el punto de retorno de la fresa (7 y 8), permitiendo que esta descendiera fuera del perímetro de la pieza y posteriormente ingresara de forma tangencial a la trayectoria de mecanizado. Esta secuencia se repitió en cada una de las pasadas programadas, reduciendo las solicitaciones generadas durante el ingreso de la herramienta y mejorando la estabilidad del proceso.

Adicionalmente, se incorporó una trayectoria de corte (9) entre las distintas piezas mecanizadas. Esta operación tuvo como objetivo generar las entalladuras de separación entre las piezas. La trayectoria (9) se ejecuta una vez finalizado el mecanizado perimetral de las piezas. Desde el

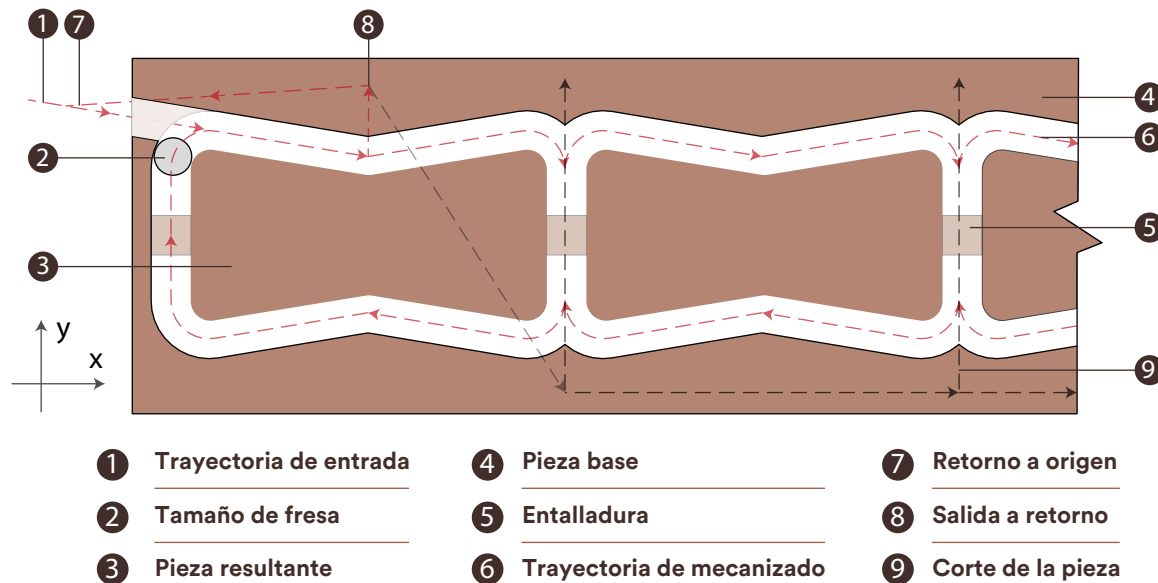


Figura 65. Vista cenital, trayectoria de mecanizado para prueba N°2. Elaboración propia

punto de salida y retorno (8), el brazo robótico asciende aproximadamente 45 cm, generando una posición segura antes de trasladarse hacia la trayectoria de corte. Posteriormente, la fresa se desplaza de manera paralela al eje Y, realizando cortes transversales entre las piezas mecanizadas.

La cantidad de pasadas de esta trayectoria depende del número total de piezas a fabricar. En este caso, el corte se repite una cantidad equivalente al número total de piezas menos uno, es decir, $(x - 1)$ veces, donde (x) corresponde al número de piezas mecanizadas dentro de una misma operación.

Como primer resultado, se logró obtener una pieza completa sin inconvenientes durante el mecanizado. Sin embargo, al continuar con la repetición de elementos, algunas piezas se fracturaron en una zona próxima a la trayectoria de entrada de la herramienta. Esta falla pudo deberse a que la ubicación de la salida a retorno (8) y el retorno a origen (7) se encontraban por fuera del perímetro del elemento mecanizado, lo que provocó que la pieza no quedara completamente fija al elemento original. En estas condiciones, el giro de la fresa y las fuerzas laterales generadas durante el mecanizado provocaron el desplazamiento de la pieza, produciendo su fractura antes de finalizar el proceso.



Figura 66. Fotografías de prueba N°2 fallida. Elaboración propia

2.6.6 Tercera prueba de mecanizado para llave

Para corregir la situación indeseada en la prueba N°2, se ajustaron las distancias asociadas a las trayectorias 7 y 8, posicionandolas por dentro del perímetro de la pieza, aumentando la cantidad de material disponible para asegurar la estabilidad de la pieza durante el proceso. Además, como medida preventiva se redujo la distancia transversal de la trayectoria de corte de pieza (9) para que la pieza conservara más material disponible para su fijación.

Por último, todas las piezas fueron trasladadas a una ingletadora para ejecutar los cortes correspondientes a las entalladuras de unión (5). Posteriormente, se eliminó el material excedente mediante una sierra huincha, y luego se utilizó una lijadora de banda, permitiendo eliminar irregularidades superficiales y obtener una superficie plana y uniforme para el posterior ensamblaje de las piezas.

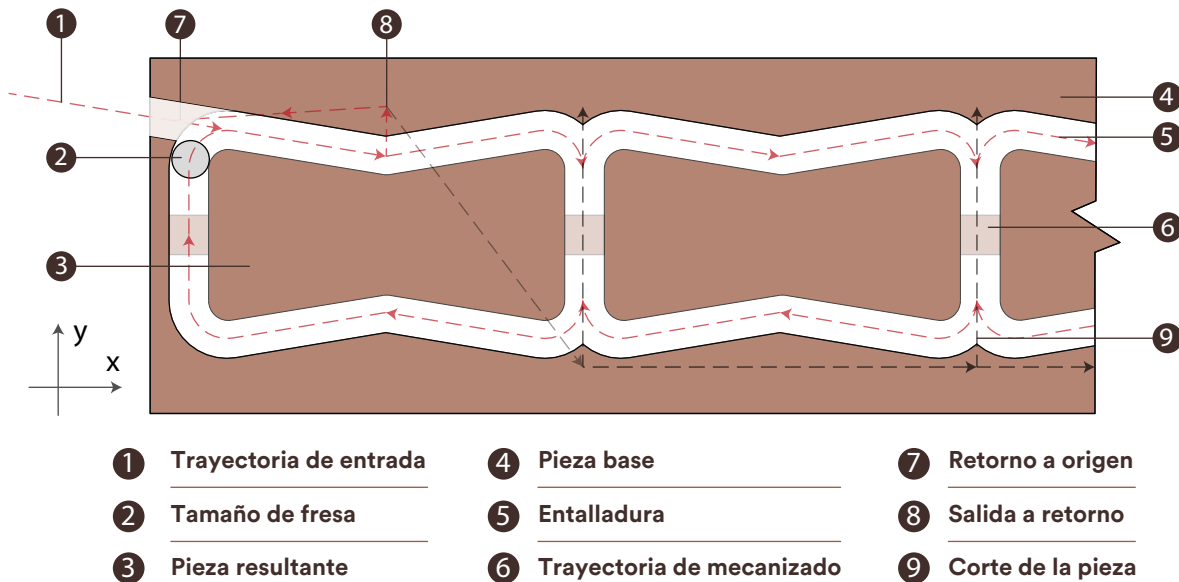


Figura 67. Vista cenital, trayectoria de mecanizado para prueba N°3. Elaboración propia

Una vez finalizado el mecanizado, las piezas fueron medidas con pie de metro con el objetivo de verificar sus dimensiones finales y comparar la variación entre elementos. Los resultados mostraron una baja variabilidad dimensional, registrándose diferencias aproximadas de hasta $\pm 0,3$ mm entre piezas.

Esta variación puede asociarse principalmente al proceso de terminación posterior al mecanizado, especialmente al uso de lijadora de banda, la cual pudo modificar levemente algunas superficies de contacto. No obstante, las diferencias observadas se mantuvieron dentro de un rango reducido, permitiendo conservar un nivel de precisión compatible con el ensamblaje de las uniones.



Figura 68. Fotografía de pieza completa mecanizada por ambos extremos, sin cortar con ingleteadora. Elaboración propia

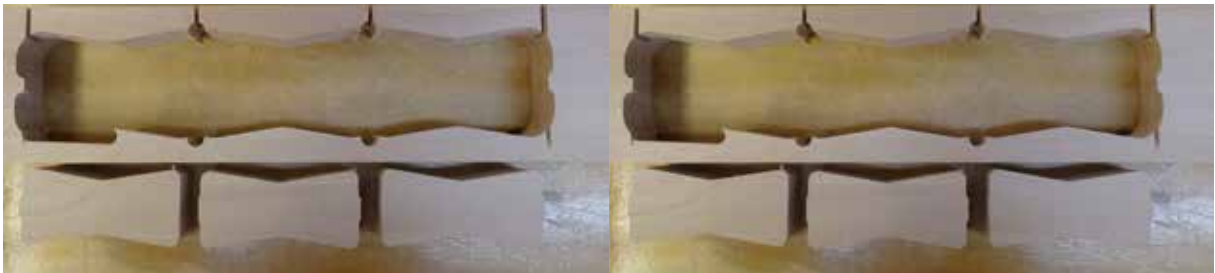


Figura 69. Fotografía de pieza mecanizada cortada con ingleteadora. Elaboración propia

FRENTE

REVERSO

Prueba N°2



Prueba N°2 fallida



Prueba N°3



Prueba N°4



La fabricación de 18 piezas requirió un tiempo total estimado de 90 minutos, considerando las etapas de mecanizado robotizado, preparación de la pieza sobre la mesa de trabajo, corte y lijado. Tanto el mecanizado como el cambio de pieza fueron realizados en tandas de tres piezas por operación, mientras que las etapas de corte y lijado se desarrollaron de forma individual para cada pieza.

Parámetro	Cantidad (unidades)	Tiempo unitario (minutos)	Tiempo total (minutos)
Mecanizado	6	6:00	36:00
Cambio de pieza	6	3:00	18:00
Corte y lijado	18	2:00	36:00
Total			90:00

Tabla 07. Registro de tiempos aproximados medidos durante el proceso de mecanizado para las llaves

2.6.7 Mecanizado de Cajas para llave

Al igual que en el mecanizado de las llaves, el diseño de las cajas receptoras se desarrolló a partir de las limitaciones de la herramienta de corte y de las condiciones geométricas de la unión. En particular, se consideraron las pequeñas diferencias presentes en las esquinas y en la cintura de la llave, debido a que estas zonas condicionan directamente el calce entre ambas piezas y la holgura necesaria para permitir su montaje.

Durante esta fase, se comenzó posicionando los primeros elementos de pino seco cepillado de 4×4 " sobre la mesa de trabajo. Las piezas originales, de 3,2 m de longitud, fueron rebajadas en uno de sus extremos mediante el corte con una engleteadora, aproximadamente a 10 cm desde el extremo, con el objetivo de obtener una cara lisa y perpendicular al eje longitudinal de la pieza.

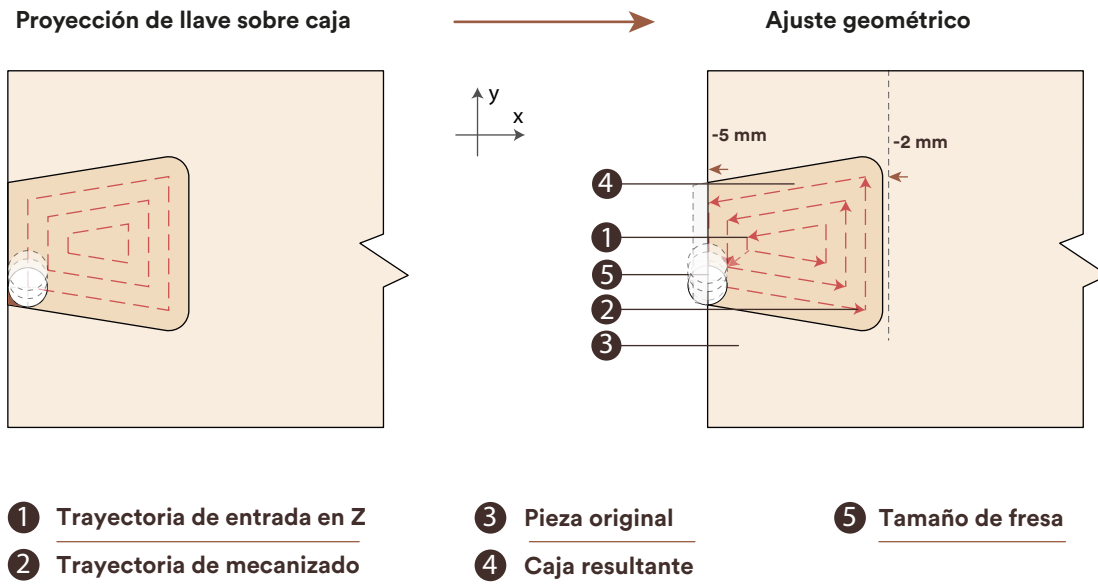


Figura 70. Ajuste de pieza para el mecanizado de la caja para las llaves. Elaboración propia

Esta operación permitió generar un extremo de referencia más preciso para el posicionamiento posterior en la mesa de trabajo. Posteriormente, la pieza fue ubicada en el punto de referencia 0,0,0, utilizando dicho extremo como base para asegurar la repetibilidad del proceso.

Durante las primeras pruebas se realizaron ajustes geométricos en la trayectoria de mecanizado. Uno de ellos consistió en desplazar 5 mm hacia el exterior la trayectoria general de corte, con el fin de asegurar que la fresa removiera la totalidad del material necesario para conformar la caja receptora (figura 70). Del mismo modo, se observó que el centro de la llave no quedaba alineado a ras con el extremo de la cintura de la caja. A partir de esta medición, se determinó la necesidad de reducir en 2 mm la dimensión correspondiente de la caja, corrigiendo así la posición final de la llave dentro del encaje.

Paralelamente se realizaron pruebas de holgura para las cajas. A partir de las iteraciones, se obtuvo un calce adecuado utilizando un offset de +0,3 mm en la programación de la caja. Considerando que las llaves también habían sido programadas con un offset propio, la holgura resultante entre ambas piezas alcanzó aproximadamente 0,6 mm.

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Pino Radiata / Pino Oregón
Revoluciones por minuto de la fresa (RPM)	30 000
Velocidad de mecanizado (m/s)	0,025
Sección del elemento (mm)	87-90
Profundidad pasada (mm)	5
Cantidad de pasadas	6-9
Profundidad total de pasada (mm)	30-45
Holgura (mm)	0,2-0,3

Tabla 08. Parámetros de mecanizado para elementos en Pino Radiata y Pino Oregón. Elaboración propia



Figura 71. Fotografías del mecanizado para las cajas.
Elaboración propia

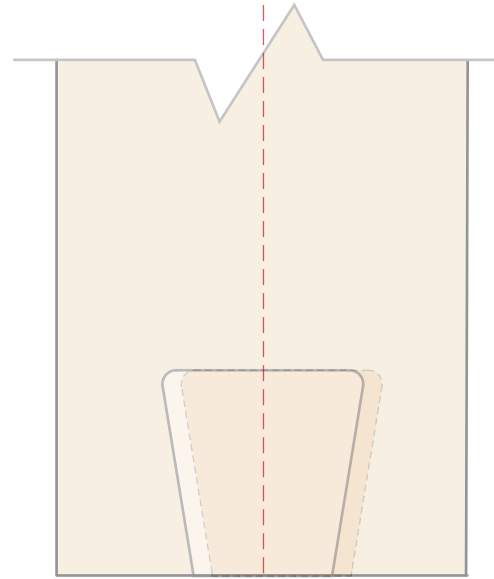


Figura 72. Desplazamiento de cajas respecto al eje central.
Elaboración propia

Una vez finalizado el mecanizado de la primera cara, la pieza fue volteada 180° para ejecutar la caja correspondiente en la cara opuesta, manteniendo el mismo sistema de referencia y alineación respecto del tope longitudinal de la mesa. Este procedimiento se repitió de manera secuencial hasta completar el mecanizado de las ocho cajas previstas para el conjunto.

Por último, se procedió a trabajar el extremo opuesto de la pieza. Para ello, el elemento fue cortado a la longitud final requerida de 2,4 m y posteriormente se repitió el mismo procedimiento de posicionamiento, referencia y mecanizado en el nuevo extremo.

Por otro lado, debido a que las piezas presentaban ligeras torsiones y variaciones dimensionales en su ancho, algunas cajas mecanizadas en los postes quedaron levemente desplazadas respecto del eje central de la pieza. Esta desviación fue de aproximadamente 2 mm en promedio. Si bien esto no impidió ni si condicionó cialmente el calce de la unión, sí condicionó la posición futura de la caja para la solera del lado opuesto del panel, dificultando la unión simultánea por ambos lados.

Para el mecanizado de las cajas en las soleras, la programación utilizada en los postes fue rotada 90°, conservando los mismos parámetros de corte, profundidad, offset y trayectoria.

Como se mencionó anteriormente, las piezas presentaban ligeras variaciones dimensionales en su ancho. Debido a que la programación no fue ajustada individualmente para cada pieza, sino que se asumió una sección constante, la posición de la caja en el eje Y presentó pequeñas variaciones respecto del centro real del elemento. Como consecuencia, algunas cajas resultaron levemente más cortas de lo previsto.

A pesar de estas diferencias, las holguras permitieron el calce simultáneo de ambas cajas y llave durante el ensamblaje, ya que el sistema contaba con cierto margen de tolerancia frente a variaciones menores del material, aunque también evidenció la importancia de incorporar ajustes paramétricos rápidos por pieza cuando se trabaja con madera de dimensiones variables.

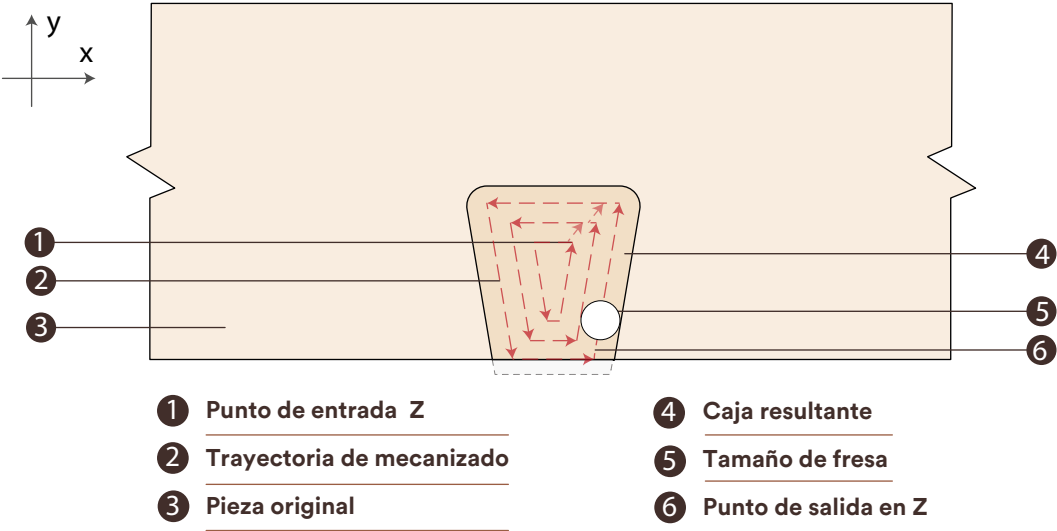


Figura 73. Vista cenital, trayectoria de mecanizado para cajas en soleras. Elaboración propia

2.6.8 Caja y espiga

Para el armado de los postes exteriores, se procedió a mecanizar las cajas destinadas a recibir las espigas correspondientes. Al igual que en los programas anteriores, se mantuvo el mismo método de trabajo, considerando el posicionamiento de la pieza sobre la mesa, su alineación respecto del sistema de referencia y la ejecución de las trayectorias previamente verificadas.

Durante esta etapa se observó que el centrado del mecanizado jugaba un rol importante al momento de posicionar los postes respecto de las soleras. Un desplazamiento en la ubicación de las cajas podía afectar el aplome del conjunto, tanto en las caras visibles del panel como en sus caras laterales.

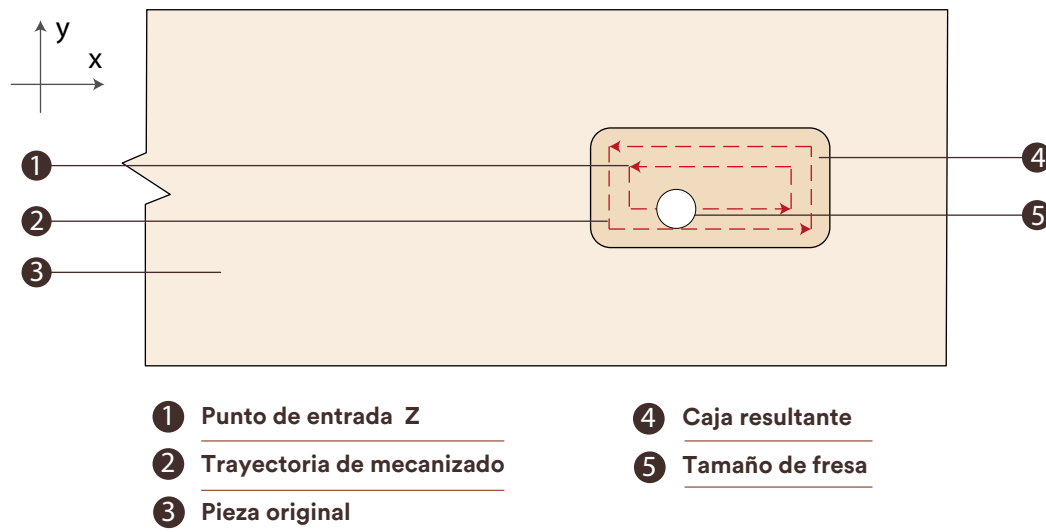


Figura 74. Vista cenital, trayectoria de mecanizado de caja para espiga. Elaboración propia

Para el momento de mecanizar las espigas en pino radiata, se evidenció un aumento progresivo de la torsión de las piezas restantes almacenadas en el laboratorio, dificultando la posibilidad de obtener un calce adecuado entre elementos. Dado que las soleras ya presentaban cierto grado de torsión, incorporar postes exteriores con deformaciones similares habría aumentado la dificultad de montaje y reducido la precisión del encaje entre piezas.

Considerando que el objetivo principal de estas pruebas era comprobar la geometría y funcionamiento de las uniones, se decidió utilizar una madera con menor variabilidad dimensional disponible para los postes exteriores y diagonales. Para ello, se optó por pino oregón, manteniendo la sección comercial de 4 × 4” y la condición de madera blanda. Esta decisión permitió reducir la incidencia de deformaciones previas en las piezas y continuar la evaluación del comportamiento de las uniones.

Al igual que en los mecanizados anteriores, la fresa del robot debía mantenerse perpendicular a la cara de la pieza. Sin embargo, en este caso la espiga requería mecanizar una superficie orientada a 90° respecto del plano horizontal de la mesa, por lo que la operación se desarrolló en el plano YZ.

Esta condición hizo necesario desplazar el área de trabajo, donde el robot contara con un espacio libre suficiente para mover la herramienta sin colisionar con la mesa. Por ello, la pieza fue dispuesta parcialmente fuera de la superficie de apoyo, permitiendo el acceso de la herramienta a la cara lateral del elemento.

Parámetro	Valor
Especie de la madera	Pino Oregón (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)
Tipo	Nacional
Tratamiento	Seca cepillada
Dureza Monnin	blanda
Densidad aproximada	470–490 kg/m ³
Contenido de humedad	< 20%

Tabla 09. Características del Pino Oregón G2, basado en el informe técnico 196 (INFOR, 2013)

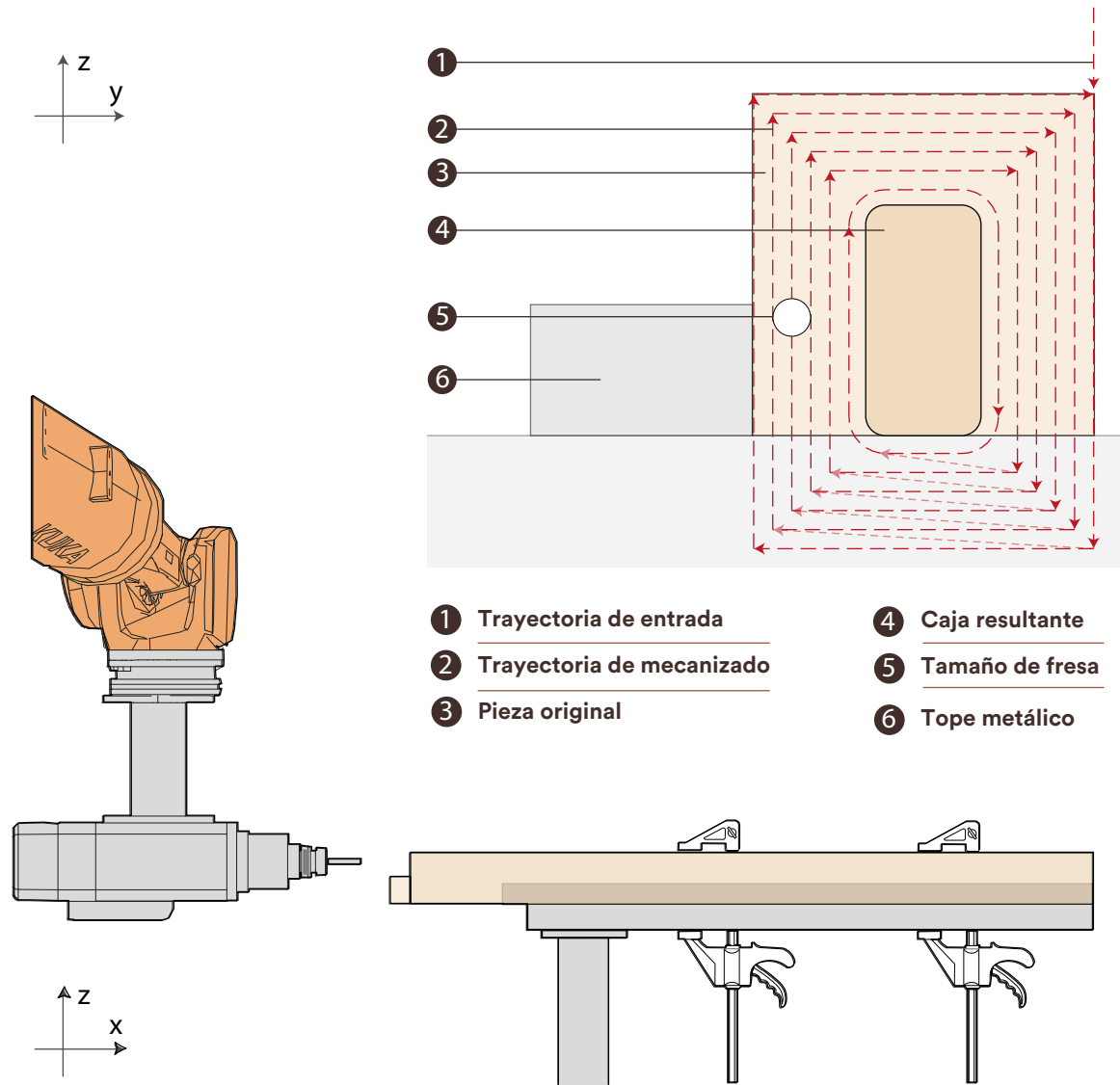


Figura 75. Vista en elevación, trayectoria de mecanizado de espiga en un nuevo plano de trabajo. Elaboración propia.

2.6.9 Media madera

Una vez finalizados los mecanizados correspondientes a postes y soleras, las piezas fueron presentadas en el suelo para iniciar una primera aproximación de armado. En esta etapa, los postes exteriores se posicionaron en sus respectivas cajas, verificando el calce inicial entre los elementos verticales y las soleras.

Durante esta prueba, realizada aún sin incorporar elementos de arriostramiento, se observó que la unión entre postes y soleras presentaba una luz aproximada de 20 mm al intentar unir simultáneamente ambos extremos del conjunto. Esta diferencia evidenció que la torsión y una leve curvatura de las soleras afectó directamente el calce de los postes exteriores.

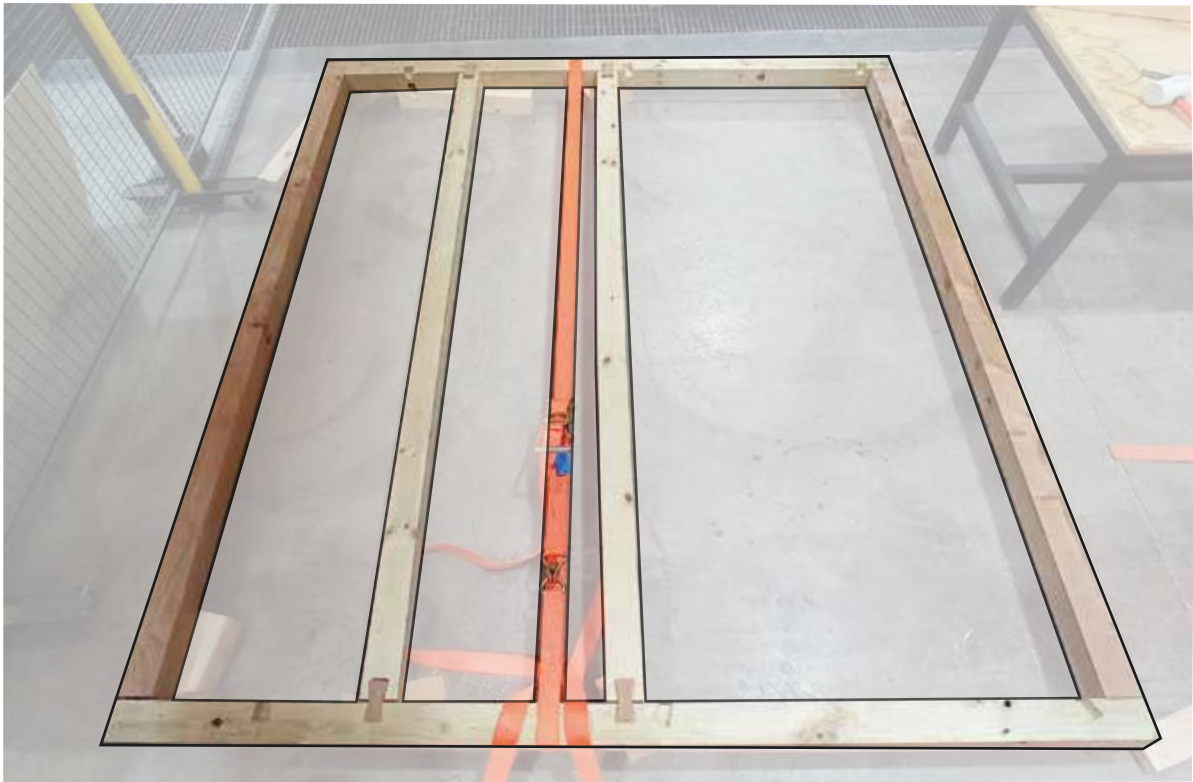


Figura 76. Fotografía intervenida del panel a medio armar sujetado con linga. Elaboración propia

Como corrección temporal, se utilizaron dos lingas dispuestas longitudinalmente a lo largo del panel, con el objetivo de aproximar las caras paralelas de los postes y las soleras. Si bien esta solución permitió avanzar en el armado del prototipo, también evidenció la importancia de controlar la deformación del material antes del mecanizado, ya que pequeñas torsiones o curvaturas pueden amplificarse durante el ensamblaje del conjunto completo.

Una vez corregida la luz entre postes y soleras, y ensamblados todos los elementos verticales, se procedió a verificar con una escuadra que los encuentros mantuvieran un ángulo de 90° . Esta verificación permitió comprobar la posición relativa de los postes respecto de las soleras antes de incorporar los elementos de arriostramiento del panel.

Posteriormente, se presentaron las diagonales sobre el conjunto armado. En primer lugar, se seleccionó una diagonal para ser colocada por debajo del panel, permitiendo marcar sobre ella la proyección del ras de las soleras. A partir de estas marcas, la pieza fue cortada mediante

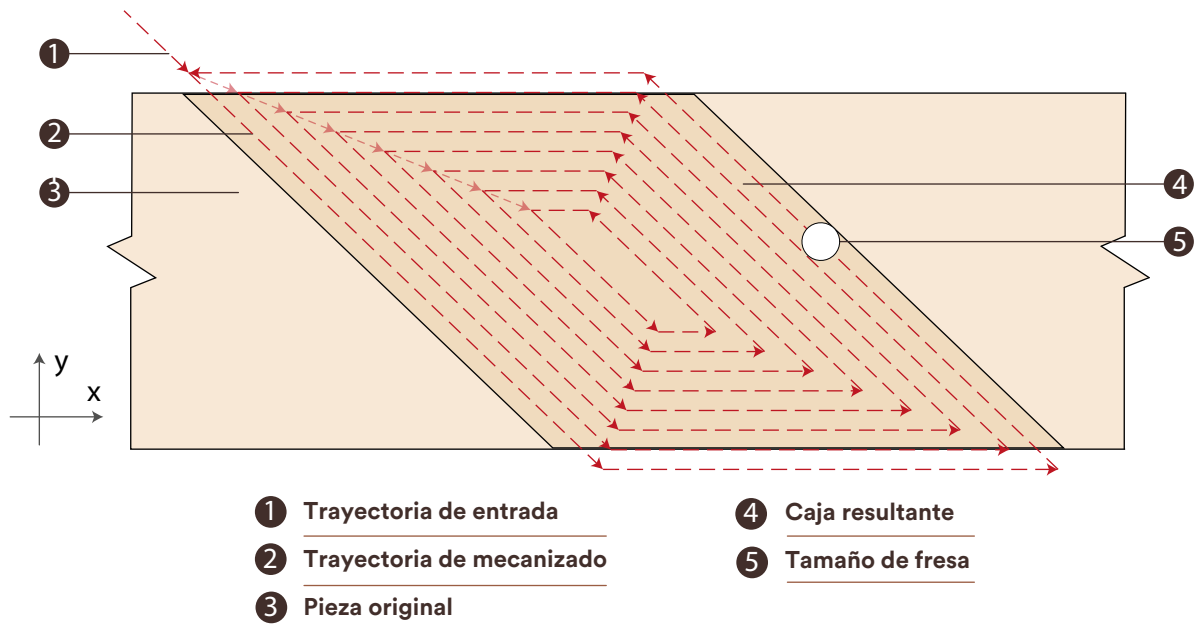


Figura 77. Vista en elevación, trayectoria de mecanizado de la media madera. Elaboración propia

engleteadora para ajustar su longitud y ángulo de encuentro. Este mismo procedimiento se repitió para la diagonal complementaria.

Una vez finalizado el corte de ambas diagonales, estas fueron nuevamente presentadas sobre el panel armado. En esta etapa se marcó la zona de cruce entre ambas piezas, correspondiente al encastre de media madera. Posteriormente, cada diagonal fue trasladada a la mesa de trabajo para ejecutar el mecanizado de dicha zona mediante el robot.

Al igual que en el mecanizado de las cajas, se utilizó una estrategia de trayectorias con offset repetido, donde la entrada de la fresa se produjo de forma tangencial respecto de la geometría a mecanizar. Del mismo modo que en la programación de la llave, la bajada en el eje Z se ubicó por fuera del elemento base, evitando que la herramienta ingresara verticalmente sobre la zona útil de la pieza. Esta estrategia permitió obtener un mecanizado más limpio, sin deformaciones considerables durante el proceso. Además, se definió un offset de 0,3 mm para el mecanizado del encastre, con el objetivo de otorgar una holgura controlada a las diagonales. Este desfase permitió facilitar el calce entre piezas, considerando que las diagonales debían adaptarse a las pequeñas variaciones generadas durante el armado del panel.

Si bien inicialmente se había considerado medir y cortar las diagonales según el modelo digital diseñado, durante el proceso se optó por presentarlas directamente sobre el panel armado. Esta decisión se tomó a partir de las deformaciones observadas en las soleras, especialmente su torsión, ya que estas modificaban levemente las luces reales del conjunto respecto del modelo digital. Con ayuda de las lingas, las variaciones de longitud respecto del modelo fueron reducidas. Sin embargo, debido a que el sistema depende del calce simultáneo entre varias piezas, incluso pequeñas diferencias dimensionales podían afectar el ensamblaje final. Por esta razón, se priorizó la medición directa sobre el prototipo real antes del corte de las diagonales.

Aunque finalmente la diferencia entre las dimensiones obtenidas desde el modelo digital y las medidas tomadas directamente sobre el prototipo fue baja, esta decisión permitió reducir el riesgo de error durante el montaje y ajustar las diagonales a la condición real del panel.

2.6.10 Cajas inclinadas

Por último, una vez comprobado el calce entre las diagonales y su correcta posición dentro del panel, se marcó con lápiz el eje longitudinal de cada diagonal. Esta línea fue utilizada como referencia para definir el centro de las cajas inclinadas, tanto en las diagonales como en las soleras, permitiendo mantener la correspondencia entre las piezas durante el mecanizado posterior.

Para el mecanizado de las cajas en las diagonales, se proyectó la geometría de la llave previamente diseñada, esta vez dispuesta de forma paralela al eje longitudinal de cada diagonal. De este modo, la caja inclinada mantuvo la misma lógica geométrica de calce utilizada en las uniones anteriores, pero adaptada a la orientación real de los elementos de arriostramiento dentro del panel.

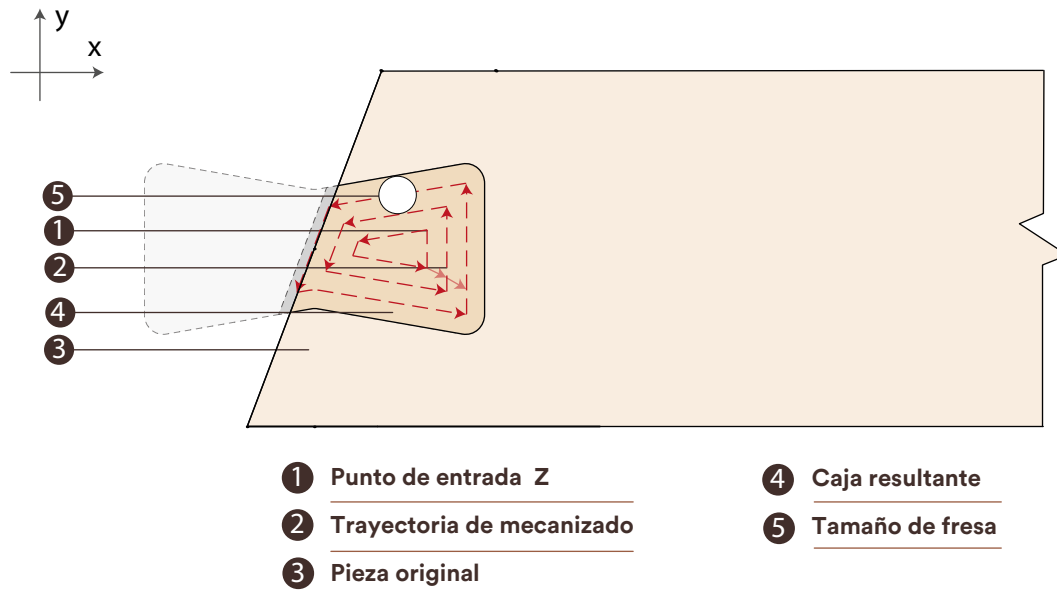


Figura 78. Vista en elevación, trayectoria de mecanizado de la caja inclinada. Elaboración propia

Una vez marcadas todas las piezas, el panel fue desarmado para proceder al mecanizado de las cajas inclinadas en las soleras. Debido a que el material volvió a cambiar a pino radiata, se decidió mantener la base de referencia previamente medida para el pino oregón, la cual consideraba una diferencia aproximada de 3 mm en el ancho de la pieza. En lugar de volver a medir y modificar físicamente la base, se ajustó la posición de las cajas directamente en el archivo de Grasshopper, permitiendo ubicar el mecanizado en la posición deseada sin alterar el sistema de referencia ya definido.

Para esta etapa fue necesario ejecutar cuatro archivos distintos, correspondientes a cada una de las cajas inclinadas ubicadas en ambas soleras. El primer archivo se utilizó como configuración original, mientras que los restantes fueron generados mediante reflexiones respecto del eje X,

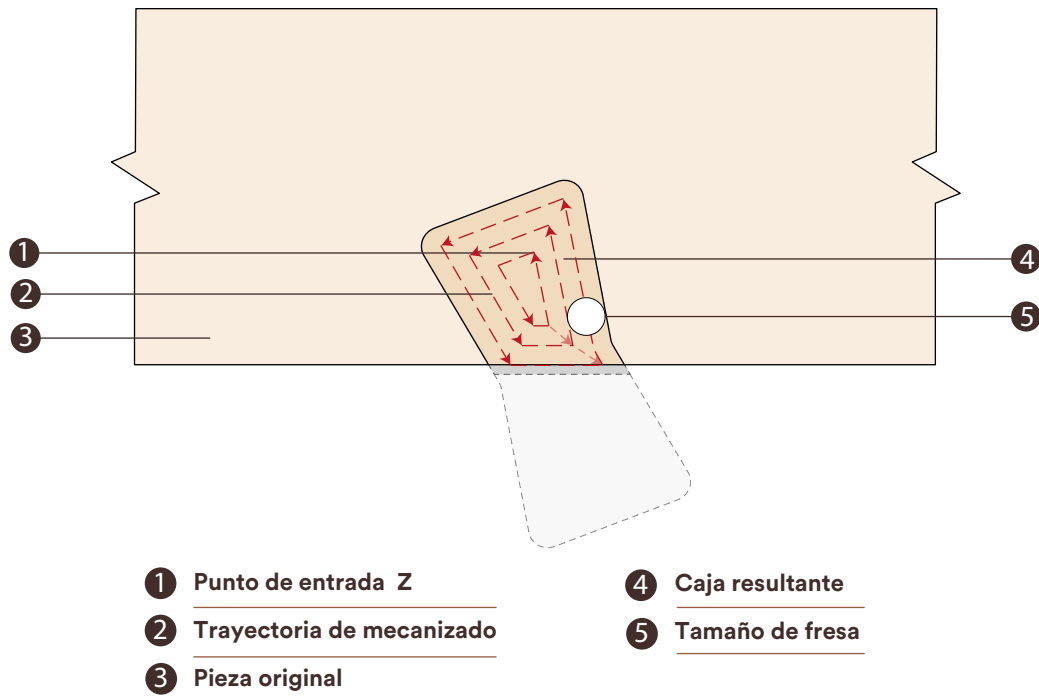


Figura 79. Vista en elevación, trayectoria de mecanizado de la caja inclinada en solera. Elaboración propia

del eje Y y de ambos ejes simultáneamente.

Además, a partir de la observación del calce de las llaves en las cajas poste-solera, se decidió mecanizar únicamente la cara frontal de las diagonales y soleras para las cajas inclinadas. Esta decisión respondió al alabeo presente en las soleras, que generaba luces que dificultarían el calce simultáneo por ambas caras. De esta manera, se buscó reducir la complejidad del ensamblaje y evitar la acumulación de errores dimensionales entre mecanizados opuestos.

El mecanizado realizado a partir de los ocho elementos constituidos para la totalidad del panel requirió un tiempo total estimado de 245 minutos, considerando las etapas de mecanizado robotizado, preparación de la pieza sobre la mesa de trabajo, sin contar las iteraciones y pruebas previas.

Tipo de Mecanizado	Cantidad (unidades)	Tiempo unitario (minutos)	Tiempo total (minutos)
Caja en poste	8	1:40	13:20
Caja en solera	8	1:40	13:20
Caja para espiga	4	1:50	7:20
Espiga	4	10:00	40:00
Media madera	2	15:00	60:00
Caja en diagonal	4	1:40	6:40
Caja diagonal en solera	4	1:40	6:40
Cambio de pieza	34	3:00	98:00
Total			245:20

Tabla 10. Registro de tiempos aproximados medidos durante el proceso de mecanizado de postes, soleras y diagonales. Elaboración propia

2.6.11 Montaje y desmontaje

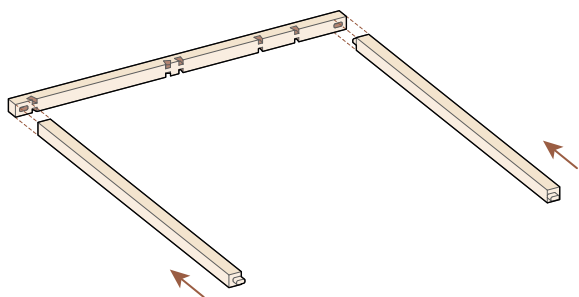
Por último, una vez finalizado el mecanizado de todos los componentes, se procedió al ensamble completo del panel. Para ello, se siguió la misma secuencia utilizada durante el montaje temporal. Tanto para este proceso como para el desmontaje se recomienda trabajar con dos operadores simultáneamente. Primero se encajaron los postes exteriores en las cajas correspondientes de las soleras, luego se utilizaron lingas para aproximar ambas soleras y reducir la luz generada por las deformaciones del material; posteriormente, se posicionaron los postes centrales y se instalaron las llaves de unión.



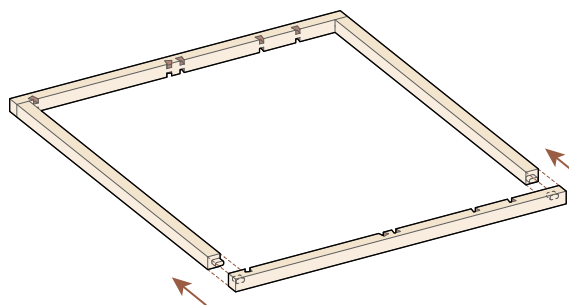
Figura 80. Fotografía intervenida del panel montado. Elaboración propia

SECUENCIA DE MONTAJE

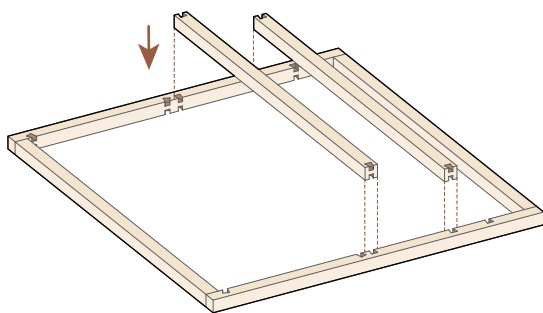
Paso 1



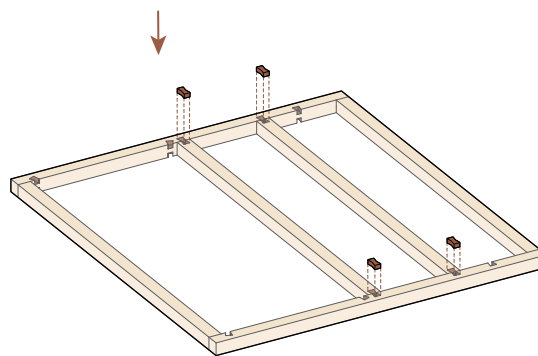
Paso 2



Paso 3

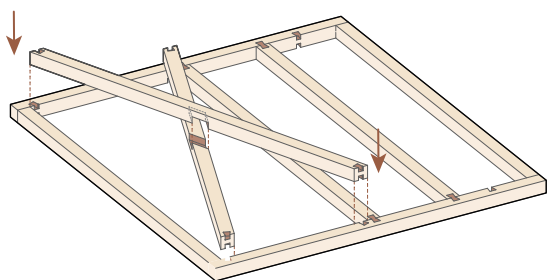


Paso 4

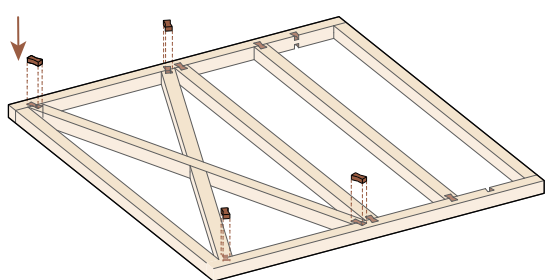




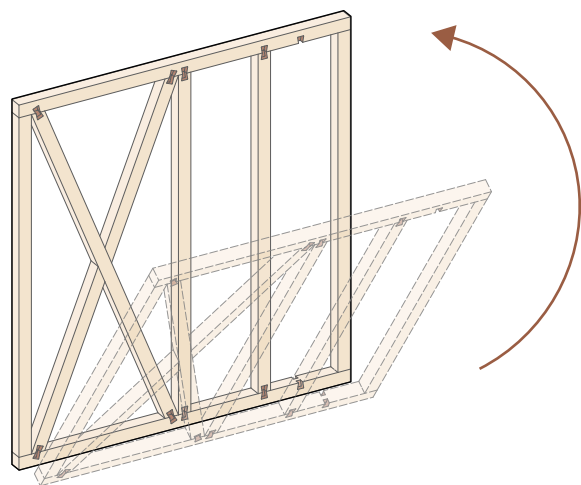
Paso 5



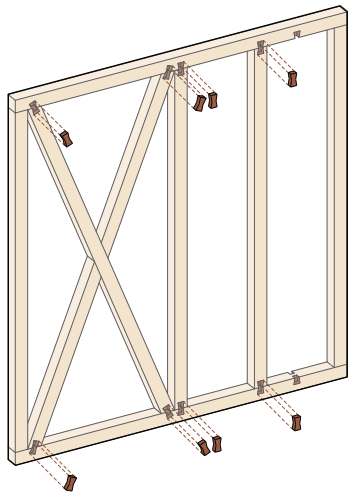
Paso 6



Paso 7



Paso Final



Una vez incorporadas las llaves correspondientes a los postes, se retiraron las lingas y se procedió a colocar las diagonales. En esta etapa, el calce de las cuatro llaves sobre las cajas inclinadas no requirió una fuerza excesiva, lo que permitió verificar que la holgura definida para el mecanizado facilitaba el ensamblaje. Sin embargo, en el último punto de calce fue necesario aplicar una técnica de palanca para completar la inserción de la pieza, evidenciando que, aunque el sistema logró ensamblarse, las pequeñas variaciones dimensionales y deformaciones acumuladas seguían incidiendo en el ajuste final del conjunto.

Para la fase de desmontaje se identificaron dos procedimientos posibles, dependiendo de la posición del panel, en primer lugar, con el panel en posición vertical, fue posible desensamblar los componentes golpeando suavemente con un mazo los extremos de las soleras. Esta acción permitió liberar progresivamente el calce de las uniones, facilitando la separación de postes, diagonales y soleras sin recurrir a cortes ni procesos destructivos.



Figura 81. Registro fotográfico del panel armado. Elaboración propia

En segundo lugar, al realizar el desmontaje con el panel en posición horizontal, fue necesario elevarlo ligeramente del suelo mediante topes ubicados en las esquinas. Esta separación permitió generar el espacio suficiente para que los postes y diagonales pudieran desplazarse verticalmente durante la extracción. En este caso, el desmontaje dependió de liberar las piezas en dirección perpendicular al plano del panel, por lo que la distancia respecto del suelo resultó fundamental para evitar interferencias durante el retiro de los componentes. Finalmente, las soleras podían retirarse horizontalmente si se encontraba acostada, y verticalmente mediante el uso de escaleras si el panel se encontraba en posición vertical.

2.6.12 Errores y consideraciones

Durante el proceso de fabricación se identificaron diversos errores y consideraciones asociados tanto a la variabilidad del material como a la precisión de los procedimientos de mecanizado y preparación de piezas. En primer lugar, algunas maderas, principalmente las piezas de pino radiata, presentaron variaciones dimensionales en su sección, alcanzando diferencias de hasta 3,0 mm en su ancho. Debido a que la programación del robot no fue ajustada individualmente para cada pieza, estas diferencias generaron pequeños desplazamientos en la posición de las cajas respecto del eje central del elemento. En promedio, se registraron desplazamientos aproximados de 2 mm.

A partir de esta condición, fue necesario corregir algunos desfases mediante compensaciones en la cara opuesta de las piezas. Esta operación no estaba considerada inicialmente dentro del proceso de fabricación y añadió nuevas etapas de ajuste al procedimiento. En consecuencia, cada corrección incorporada aumentó la posibilidad de acumular errores entre medición, posicionamiento, mecanizado y ensamblaje.

Otro aspecto relevante correspondió a las deformaciones previas de la madera. Si bien las piezas seleccionadas correspondían a material disponible comercialmente para personas naturales, algunas presentaron torsiones y curvaturas longitudinales significativas. En el caso del pino radiata, se observó que varias piezas no se encontraban completamente secas, condición que pudo incidir en una mayor tendencia a deformarse durante el almacenamiento y el desarrollo de las pruebas.

En términos ideales, la investigación habría requerido piezas de pino radiata con mayor estabilidad dimensional, menor contenido de humedad y mejor control de secado. Sin embargo, debido a las restricciones de tiempo del proceso experimental, se optó por incorporar piezas de pino oregón para los postes exteriores y diagonales, ya que el material disponible en esta especie presentaba menores deformaciones visibles y una sección más estable para continuar con el mecanizado y montaje del prototipo.

Si bien las holguras definidas en las uniones permitieron absorber parcialmente algunos giros y desviaciones, en determinadas etapas fue necesario forzar los postes para lograr el calce simultáneo en ambos extremos. Esta operación generó esfuerzos no previstos sobre las piezas y produjo una rajadura en la madera, afectando directamente la integridad del elemento y el ajuste de las llaves dentro de sus cajas.



Figura 82. Fotografía intervenida de las rajaduras en el poste más torcido. Elaboración propia

Finalmente, se identificó que las herramientas externas al robot también incidieron en la precisión final de las piezas. En particular, la engleteadora presentó ligeros desplazamientos y variaciones angulares en su calibración, lo que afectó la perpendicularidad de los cortes y, por consecuencia, la relación de la pieza con el origen de trabajo 0,0,0. Estas pequeñas desviaciones se reflejaron en cajas ligeramente desplazadas o más pequeñas. Por lo tanto, el proceso evidenció que la precisión del sistema no depende únicamente del robot, sino también de la preparación previa del material, la calibración de herramientas auxiliares y la correcta definición del sistema de referencia físico-digital.

3. CONCLUSIONES

En síntesis, el desarrollo del prototipo permitió comprobar la factibilidad inicial del sistema propuesto, al fabricar, montar, desmontar y reensamblar un panel mediante uniones carpinteras mecanizadas. A través del mecanizado robotizado fue posible obtener piezas con una precisión suficiente para permitir el calce entre componentes, mientras que las pruebas de montaje evidenciaron que este tipo de uniones puede funcionar como una alternativa constructiva orientada a la reversibilidad del panel.

Al revisar los objetivos planteados para esta investigación, es posible señalar que estos fueron abordados progresivamente a lo largo del trabajo. En primer lugar, el análisis de los sistemas actuales de paneles en carpintería ligera permitió comprender las condiciones técnicas, normativas y productivas que orientan la construcción industrializada en madera. Esta revisión incorporó antecedentes sobre sistemas constructivos, diseño para desmontaje, materialidad, escuadrías y arriostramiento, estableciendo una base para definir los criterios del prototipo.

En segundo lugar, el objetivo asociado al diseño del panel se cumplió mediante el desarrollo de una propuesta que integra uniones carpinteras mecanizadas, tipologías de encuentro, criterios de desmontaje y estrategias de fabricación robotizada. El diseño no se limitó a la forma final del panel, sino que consideró la geometría de sus piezas, las tolerancias de mecanizado, la secuencia de armado, el comportamiento de las uniones y la posibilidad de adaptar el sistema a distintas configuraciones mediante herramientas digitales.

Finalmente, el objetivo de fabricar y validar técnicamente un prototipo fue abordado mediante la producción de un panel a escala real utilizando un brazo robótico industrial. Esta etapa permitió registrar tiempos de mecanizado, montaje y desmontaje, además de observar errores, holguras, deformaciones del material y dificultades de ensamblaje. Si bien el prototipo requirió algunos

ajustes manuales durante las etapas finales de armado, esta condición no invalida la factibilidad del sistema, sino que permite acotar el tipo de validación alcanzada.

En este sentido, los resultados no deben entenderse como una validación técnica definitiva del panel, ni como una comprobación estructural o normativa del sistema, sino como una verificación preliminar de su viabilidad geométrica, constructiva y de montaje. Las deformaciones de la madera, las variaciones dimensionales, los desfases de mecanizado, la precisión de cortes auxiliares y la acumulación de pequeños desfases incidieron directamente en el comportamiento final del prototipo, evidenciando que estas variables deben ser consideradas desde las primeras etapas de diseño y fabricación, especialmente para los diseños de las uniones.

Por lo tanto, la investigación permite afirmar que la propuesta es técnicamente factible en un nivel experimental inicial, pero que su aplicación como sistema constructivo replicable requeriría nuevas iteraciones, mayor control dimensional del material y ensayos específicos que permitan evaluar su desempeño estructural, productivo y normativo.

4. DISCUSIÓN

El montaje y desmontaje reiterado de las piezas puede afectar progresivamente el comportamiento de las uniones, especialmente cuando estas dependen del ajuste geométrico entre superficies de madera. Del mismo modo, las variaciones no controladas de humedad y temperatura pueden producir cambios dimensionales en el material, generando expansión o contracción según las condiciones ambientales. Estas variaciones pueden modificar la holgura, la fricción y la rigidez inicial de la unión, afectando su capacidad para mantener el calce entre componentes. Esta condición resulta especialmente relevante durante etapas de manipulación, levantamiento o izaje del panel, donde la continuidad y rigidez de las uniones son fundamentales para asegurar la estabilidad del conjunto y la seguridad de los operarios.

En relación con los tiempos de fabricación, se observó que los tiempos de mecanizado más largos correspondieron a las uniones de media madera y espigas, debido al volumen de material removido y la cantidad de pasadas requeridas. Como posible optimización, se propone el uso de fresas de mayor diámetro o herramientas específicas para reducir tiempos en operaciones de desbaste. Asimismo, tareas de menor complejidad podrían derivarse a maquinaria convencional, como routers CNC, reservando el brazo robótico para operaciones que requieran mayor libertad de movimiento o variación angular.

Además, aunque los tiempos de mecanizado y montaje fueron acotados y se puede seguir optimizando, en metodologías DfMA una parte importante del tiempo se concentra en etapas previas, como el diseño del sistema, la programación de trayectorias y la verificación de tolerancias. Por ello, la eficiencia del sistema no debe evaluarse solo por el tiempo de mecanizado o ensamblaje, sino también considerando la inversión de tiempo destinado para el diseño y planificación.

Durante el montaje se observó que la aplicación de fuerza excesiva sobre el sistema puede comprometer la integridad de las piezas, especialmente cuando existen deformaciones previas, torsiones o desalineaciones entre componentes. En estos casos, forzar el calce puede producir rajaduras, cortes de fibra o fallas localizadas en la madera. Por esta razón, se recomienda que las piezas con torsiones significativas sean reemplazadas o descartadas antes del mecanizado, ya que su incorporación puede aumentar la dificultad de montaje y generar daños durante el ensamblaje.

Asimismo, se identificó que el uso de múltiples uniones simultáneas aumentó la complejidad del armado, especialmente cuando las piezas debían calzar en ambas caras del panel al mismo tiempo. Esta condición generó una mayor acumulación de tolerancias y dificultó el ajuste entre postes, soleras y llaves. En este sentido, una alternativa para futuras iteraciones podría ser evaluar una unión de mayor profundidad o incluso una unión pasante, siempre que su geometría no debilite excesivamente la sección del elemento. Esta opción podría reducir la cantidad de calces independientes y simplificar la secuencia de montaje.

Por otro lado, se observó que la doble llave no requería necesariamente un calce completo o totalmente ajustado en toda la superficie de la caja para cumplir su función dentro del prototipo. La unión presentaba cierto margen de movimiento en su eje de inserción, mientras que sus caras laterales mantenían contacto con la madera, permitiendo restringir desplazamientos relativos entre los elementos. Esta condición evidencia que el funcionamiento de la llave no depende únicamente de un ajuste por fricción total, sino también de la geometría del encaje, las superficies de contacto activas y la dirección en que se restringen los movimientos del conjunto.

5. TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de trabajo futuras orientadas a mejorar el desempeño constructivo, productivo y técnico del sistema propuesto. En primer lugar, resulta necesario profundizar en el estudio de las uniones carpinteras utilizadas, evaluando posibles variaciones geométricas que faciliten el montaje y reduzcan la necesidad de aplicar fuerza excesiva durante el ensamblaje. En este sentido, una mejora posible corresponde a incorporar pequeños rebajes, chaflanes o biseles en las cajas y piezas de doble cola de milano, con el objetivo de facilitar el primer contacto entre elementos y guiar su inserción durante el armado.

Asimismo, se considera pertinente explorar otros tipos de uniones que permitan un montaje más tolerante frente a piezas con torsiones, alabeos o variaciones dimensionales apreciables. Dado que el prototipo evidenció la sensibilidad del sistema frente a deformaciones propias de la madera, futuras investigaciones podrían comparar distintas geometrías de encaje en función de su facilidad de armado, capacidad de desmontaje, rigidez inicial, holgura admisible y comportamiento frente a ciclos sucesivos de montaje y desmontaje.

Otra línea de investigación corresponde a la incorporación de pasadores, tarugos o clavijas de madera como complemento a las uniones principales. Esta alternativa podría permitir aumentar la fricción, restringir desplazamientos específicos o mejorar el amarre entre elementos, sin recurrir necesariamente a conectores metálicos. Su aplicación debería evaluarse mediante ensayos específicos, considerando su influencia en la desmontabilidad, la resistencia local de la madera, el desgaste de las piezas y la posibilidad de reemplazo o reutilización.

Desde el punto de vista digital y productivo, una proyección relevante consiste en automatizar con mayor profundidad el flujo de diseño y mecanizado. En futuras etapas, el programa paramétrico podría adaptarse para generar automáticamente las geometrías de unión y

las trayectorias de mecanizado a partir de parámetros básicos, como las dimensiones del panel, la sección de las piezas, la posición de postes, diagonales y soleras, y la configuración de encuentros requerida. Esto permitiría mecanizar un conjunto completo de piezas con menor intervención manual y mayor continuidad entre diseño, programación y fabricación.

No obstante, para alcanzar este nivel de automatización sería necesario trabajar con piezas de madera de muy baja variación dimensional, o bien incorporar sistemas de medición previa que permitan ajustar el modelo digital a las dimensiones reales de cada elemento. De lo contrario, las diferencias entre la geometría programada y el material físico podrían seguir generando desfases, holguras o interferencias durante el montaje.

Finalmente, futuras investigaciones deberán abordar la validación estructural del sistema mediante cálculo específico y ensayos mecánicos. Si bien esta investigación permitió verificar una factibilidad geométrica, constructiva y de montaje en un nivel experimental inicial, el desempeño del panel frente a cargas verticales, acciones laterales, ciclos de carga, izaje, transporte y reutilización requiere ser evaluado con mayor profundidad. Estos estudios permitirían determinar con mayor precisión el alcance real del sistema como alternativa para vivienda industrializada en madera.

REFERENCIAS

Banco Mundial. (2020). La construcción de viviendas en madera en Chile pp. 28-29.

Bauer, S., & Pauli, D. (2024). The Joinery Compendium: Learning from traditional woodworking. Ruby Press.

Bogue Sandberg, L., Bulleit, W. M., & Reid, E. H. (2000). Strength and stiffness of oak pegs in traditional timber-frame joints. *Journal of Structural Engineering*, 126(6), 717–723. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:6\(717\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(717))

Centro UC de Innovación en Madera. (2023). Catálogo de soluciones constructivas para la industrialización.

CINTAC. (s. f.). Casa VITA de CINTAC [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JHVWVJLesn8>

Cornejo, C., Jiménez, B., & Pérez, L. (2024). Metodología para el diseño de refuerzo para uniones carpinteras en construcciones tipo tabique-adobillo. *Memorias del Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra - SIACOT*, (22), 103–114.

Erman, E. (2002). Demountable timber joints for timber construction systems. *Architectural Science Review*, 45(2), 133–143. <https://doi.org/10.1080/00038628.2002.9697501>

González-Böhme, L. F., & Valenzuela-Astudillo, E. (2023). Mixed reality for safe and reliable human-robot collaboration in timber frame construction. *Buildings*, 13(8), 1965. <https://doi.org/10.3390/buildings13081965>

org/10.3390/buildings13081965.

Guy, B., & Ciarimboli, N. (2007). Design for disassembly in the built environment: A guide to closed-loop design and building. Hamer Center for Community Design, The Pennsylvania State University.

Helmreich, M., Mayer, H., Pacher, M., Nakajima, T., Kuroki, M., Tsubata, S., Gramazio, F., & Kohler, M. (2022). Robotic assembly of modular multi-storey timber-only frame structures using traditional wood joinery. In Proceedings of the 27th Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) (Vol. 2, pp. 111–120). CAADRIA. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.111>

Instituto Forestal. (2016). Informe técnico 209: Tensiones admisibles de madera de pino radiata proveniente de la Región del Bío Bío.

Instituto Forestal. (2013). Informe técnico 196: Grados estructurales de la madera aserrada de pino oregón clasificada visualmente.

Instituto Nacional de Normalización. (2024). NCh1198:2024: Madera — Construcciones en madera — Cálculo.

International Organization for Standardization. (2020). ISO 20887:2020: Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance. ISO.

Joyce, G. (2019). Finding the key: Designing timber connections for CLT panels. <https://doi.org/10.26686/wgtn.17142785>

Juárez, C., Reyes, C., & Guindos, P. (2025). Manual de transporte y montaje de paneles de madera contralaminada (CLT).

Lessing, J. (2006). Industrialised House-Building Concept and Processes.

Madera21. (2022). Carpintería de armar robotizada. <https://www.madera21.cl/project-view/carpinteria-de-armar-robotizada/>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2023). Resolución Exenta N.º 59.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2025). Déficit habitacional cuantitativo Censo 2024: Resultados comunales y comparación con 2017 y 2002.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2026). Informe nacional del Plan de Emergencia Habitacional 2022–2026.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, & Centro UC de Innovación en Madera. (2024). Guía de diseño e industrialización en madera.

Quitral-Zapata, F. J., González-Böhme, L. F., García-Alvarado, R., & Martínez-Rocamora, A. (2020). Workflow for a timber joinery robotics. *Blucher Design Proceedings*, 8(4), 291–296. <https://doi.org/10.5151/sigradi2020-40>

Rothoblaas. (s. f.). MANTIS: Correa reutilizable para el transporte de paredes y elementos prefabricados. <https://www.rothoblaas.es/productos/maquinas-y-herramientas/transporte-y-elevacion/mantis>

Roxas, C. L. C., Bautista, C. R., Dela Cruz, O. G., Dela Cruz, R. L. C., De Pedro, J. P. Q., Dungca, J.

R., Lejano, B. A., & Ongpeng, J. M. C. (2023). Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) and Design for Deconstruction (DfD) in the Construction Industry: Challenges, Trends and Developments. In *Buildings* (Vol. 13, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings13051164>

Sato, H., & Nakahara, Y. (1995). *The complete Japanese joinery*. Hartley & Marks.

Seike, K. (1977). *The art of Japanese joinery*. J. Weatherhill.

StructureCraft. (2025). Barbados National Performing Arts Centre, Phase 1. <https://structurecraft.com/projects/barbados-national-performing-arts-centre-phase-i>

Tavares, V., Soares, N., Raposo, N., Marques, P., & Freire, F. (2021). Prefabricated versus conventional construction: Comparing life-cycle impacts of alternative structural materials. *Journal of Building Engineering*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102705>

Technische Hochschule Köln. (2026). Timber joinery database. <https://joints.web.th-koeln.de/>

Torres, V., Íñiguez-González, G., Blanchet, P., & Giorgio, B. (2025). Challenges in the Design for Disassembly of Light Timber Framing Panelized Components. *Buildings*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/buildings15030321>

Yan, Z., Ottenhaus, L. M., Leardini, P., & Jockwer, R. (2022). Performance of reversible timber connections in Australian light timber framed panelised construction. *Journal of Building Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105244>

ANEXOS

ANEXO A- Archivos grasshopper (.gh)

https://usmcl-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/vicente_bulnes_usm_cl/IgCOP5fyB0H-QIoISiAdlCsAXTpIsnEEl2eKAcI3fmXI5E?e=WHIv26

ANEXO B- Fotografías y videos de los prototipos

https://usmcl-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/vicente_bulnes_usm_cl/IgCgEmv1pt-sQK9F-WL_WJgEHAYx1HegfThtKl7uQC2Rip5E?e=UZA93V