

Análisis y evaluación de las posibilidades de una máquina Router CNC de tres ejes para la fabricación de uniones carpinteras patrimoniales

Estudiante: Katalina Genoveva Zambrano García

Profesor guía: Felipe López Taverne

Resumen

Las tecnologías más avanzadas de mecanizado robótico nos permiten desarrollar la mayoría de las uniones carpinteras, con el objetivo de optimizar su elaboración y que éstas no desaparezcan a lo largo del tiempo. Sin embargo, se alejan de ser una alternativa de construcción asequible para quienes buscan implementar una herramienta de control computarizado en su oficio. Es por esto, que en esta investigación se analizan y evalúan las posibilidades de una máquina de fresado CNC de tres ejes para delimitar su alcance geométrico en relación a la fabricación de uniones carpinteras y deslumbrar el sistema como una oportunidad accesible para el oficio carpintero. Finalmente, mediante prototipos, se distingue la cantidad de uniones posibles a elaborar con una máquina de fresado CNC de tres ejes, los criterios de fabricación y las diferencias en las tolerancias de ingreso a utilizar según dos variables principales: el tipo de madera y el tipo de encuentro.

Palabras clave: Fabricación digital, Uniones carpinteras, Carpintería de armar, Máquinas CNC, Oficios.

1. Introducción

La madera como material constructivo en Chile está presente desde los primeros asentamientos en el territorio, dado al abundante acceso al material que se mantiene hasta el día de hoy. Asimismo, se fueron desarrollando diversas técnicas constructivas que optimizaron su uso en pos de la construcción arquitectónica. (Borrás, 2010) Sin duda, la madera se trabaja en base a uniones, como dice Böhme y Ansaldo (2019): Se pueden distinguir tres clases de unión para el encuentro de los miembros de un entramado de madera según el medio de transmisión de los esfuerzos: mecánica, carpintera y su combinación.

La carpintería de armar, oficio que trabaja la madera tallada, evidencia una paulatina desaparición dado a diversos factores, uno de ellos mencionados en la siguiente cita; donde el tiempo y la manufactura, juegan un rol sumamente importante ya que suponen una barrera en su uso constructivo en la actualidad.

“Situación de desplazamiento y olvido, en la cual el tiempo funciona como un factor clave al confeccionar una unión carpintera tradicional.” (Verdugo Bascañán, 2020, p. 5)

El estudio Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno en madera, consolidan la factibilidad de desarrollar las uniones carpinteras mediante la fabricación digital parametrizada y robots industriales como una alternativa flexible, rápida y con baja tasa de errores en su manufactura. (González Böhme et al., 2017)

No obstante, su acceso es limitado en términos de costo y, además, este tipo de maquinaria no es usual en la industria de la construcción ni menos en la carpintería de armar. (González Böhme et al., 2017) Por esto mismo, se ve como una alternativa la implementación de una maquinaria más sencilla que pueda fabricar las uniones carpinteras como una máquina de fresado CNC de tres ejes, las cuales ya se han masificado en otros oficios como por ejemplo mobiliarios de fabricación local.

Bajo la misma línea, existe una iniciativa de democratizar el acceso a estas máquinas CNC, uno de esos ejemplos es el emprendimiento llamado Fácil CNC, donde sus máquinas de fresado son diseñadas y fabricadas en Chile con 80% de materia prima nacional. (FácilCNC, 2022) Cabe mencionar, que se encuentran fresadoras CNC desde tres ejes hasta los seis ejes; a medida que se aumenta el número de ejes, se pueden controlar más dimensiones en relación con la pieza, pero también hay que tomar en consideración que el aumento de ejes va de la mano con el alza del precio. (Garrigues, 2022)

Las máquinas de fresado CNC de tres ejes que poseen las herramientas mínimas para poder fabricar una cantidad determinada de uniones carpinteras factibles, se contempló como una oportunidad asequible que apoya al oficio carpintero y facilita el desarrollo de las uniones logrando un buen nivel de manufactura.

Dado a lo anterior, esta investigación determinó cuál es la cantidad aproximada de uniones carpinteras posibles de fabricar mediante una máquina de fresado CNC de tres ejes y se comprendió desde sus restricciones, qué cambios son necesarios ya sea en la máquina o en la geometría de las uniones, para desarrollar la mayor cantidad de uniones carpinteras patrimoniales posibles.

2. Antecedentes

2.1. Uniones carpinteras patrimoniales

El arte carpintero o carpintería de armar, es un trabajo que contempla técnicas de gran complejidad, dado a que exige una precisión única y largas horas de trabajo al momento de fabricar una unión carpintera, y que, para un buen desarrollo del ensamble es fundamental una mano de obra calificada. (Verdugo Bascuñán, 2020)

Sin embargo, en la actualidad el saber-hacer carpintero y las uniones carpinteras, están paulatinamente desapareciendo a partir del olvido de la cultura tradicional de armar. Verdugo (2020) en su trabajo de Uniones carpinteras: Tradición técnica y cultura de un oficio, identifica aspectos tanto culturales como técnicos como los causantes de la pérdida de este oficio, y al mismo tiempo, poner en valor y reactivar la carpintería de armar.

La técnica y geometría de las uniones carpinteras desarrolladas en Chile ha sido profundamente estudiada y documentada, principalmente en Valparaíso y Chiloé, lugares donde se concentran y se busca conservar el patrimonio de las uniones. Además, el levantamiento de estas uniones facilita un orden en términos de clasificación y criterios para fabricar de manera rigurosa y metódica cada unión carpintera. (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019)

2.2. Valor cultural y casos de restauración

Es pertinente destacar que el valor no está solo en la arquitectura, sino más bien en la técnica rudimentaria del saber propio y su identidad, que se forma en compañía de la abundancia de la madera, la cual permite la construcción de diversos artefactos esenciales, versátiles y presentes dentro de lo cotidiano en la cultura chilena. El patrimonio inmaterial relacionado a la carpintería es abundante en la zona sur de Chile, como la carpintería de ribera tradicional en la Región de Los Lagos que construye embarcaciones de madera mediante técnicas manuales aprendidas de generación en generación. (SNPC, 2020)

Por otro lado, se reconoce un constante desarrollo en la elaboración de los elementos debido a la creciente innovación tecnológica. Esto no quita que entre ambas se puedan complementar, la tecnología y los oficios tradicionales, de modo que se genere un equilibrio entre lo tradicional y la era computarizada para reforzar la conservación de estas técnicas constructivas y culturales. (Roldán Tonioni, 2015)

Parte del patrimonio de la humanidad son las Iglesias de Chiloé, consideradas dentro del Consejo de Monumentos Nacionales, las cuales fueron producto del mestizaje entre los jesuitas y chilotes gracias a la Misión Circular empleada en la zona por el grupo religioso jesuita. La UNESCO declaró a 16 de estas Iglesias de Chiloé como SPM (Sitio Patrimonio Mundial), las cuales fueron evaluadas tanto en su valor cultural como en el ámbito integral del edificio. Esta última revisión, es primordial para definir cuáles requieren de medidas de restauración para conservar lo más posible la originalidad del modelo. (CMN, 2014)

Uno de los casos de restauración fue la Iglesia de San Francisco de Castro, en la que se trabajó por tres etapas: primeramente, se ejecutó una limpieza exhaustiva de insectos alojados en las secciones de madera de las naves, en segundo lugar, se reemplazaron diversas piezas deterioradas que provocaban el desaplome de las torres, las cuales contaban con diferentes tipologías de uniones que se documentaron y reprodujeron de forma exacta en cada pieza y finalmente, una intervención de pinturas de color característicos de la iglesia dado al desgaste que presentaban las superficies exteriores. (Berg Costa, 2007)

Además de las Iglesias de Chiloé, existen los Galpones del Lago Llanquihue, que cuenta con diversos casos que son necesarios de atender y valorizar histórica y arquitectónicamente. La técnica constructiva de los galpones fue traída en su mayoría por alemanes desde 1846, levantando estas estructuras para almacenar paja y resguardar a sus animales del frío. (Webmaster, 2015)

“El proceso es como armar un rompecabezas: al haber sido contruidos sin pernos ni clavos, sólo por medio del ensamblaje, se enumeran las maderas y vigas, se desmontan, y luego se vuelven a armar en otro lugar.” (Pérez Barros, 2015)

Dado a su característica desarmable, varios de estos galpones se reciclan o reutilizan, rescatando elementos estructurales o interiores como cerchas y puertas que luego daban origen a proyectos nuevos o a la restauración del mismo.

2.3. Incorporación tecnológica al oficio

La incorporación tecnológica al oficio desprende principalmente dos variables, una de ellas es el uso de la tecnología como una herramienta que facilite la fabricación de un determinado elemento, sin perder de vista la fabricación en detalle del artefacto que aporta el saber propio de un obrero calificado, y, por otro lado, el uso de la tecnología como una herramienta de producción en masa, utilizado por industrias con el fin de automatizar el proceso de elaboración. (González Böhme et al., 2017)

Entendiendo estas dos formas de elaboración, se distingue un factor en común, que es la accesibilidad. Para un obrero que fabrica un artefacto a nivel local con respecto a una tecnología compleja, como un robot industrial, el acceso es mínimo o casi irreal. Sin embargo, una empresa o una institución académica podría introducir robots industriales.

En el caso de la carpintería o el trabajo en madera, la técnica va en constante evolución, que se denomina Industria 4.0 en estructuras de madera, la cual opera con tecnologías inteligentes a fin de explorar mayores posibilidades geométricas de construcción y de producción avanzada. Esto en relación a que actualmente la mayoría de las estructuras en madera se fabrican con maquinarias CNC, produciendo uniones diseñadas para el montaje manual, lo cual habla de una adaptación en el desarrollo de fabricación de las uniones en la construcción. (Eversmann, 2019)

2.4. Adaptación de la geometría

Inicialmente, debemos comprender lo que implica la práctica del diseño, en otras palabras, problematizar el enfoque del diseño antes de definir una metodología de investigación, un proceso en el que el problema y la solución surgen juntos. De modo que, al diseñar un proceso de fabricación se parametrizan límites que ordenen los datos y faciliten su futura relación a modo reflexivo entre lo práctico y lo teórico. (Frankel & Racine, 2010)

“El diseño es tanto una disciplina de creación como un marco integrado de reflexión e investigación. Esto significa que la investigación del diseño busca explicaciones además de resultados inmediatos.” (Friedman, 2000, p. 20)

En definitiva, es entender la importancia de las relaciones entre la acción y el procedimiento de manera sincrónica; considerando el diseño y la fabricación de uniones carpinteras, se pone en vista su elaboración a partir de herramientas digitales mecanizadas. Estos sistemas podrían contar con limitaciones a la hora de construir una unión, las cuales se deberán identificar a modo de centrar la atención en la geometría de las uniones, en el caso de que no se puedan fabricar, para optimizar el ensamble de las respectivas uniones.

En el estudio Tsugite: Interactive Design and Fabrication of Wood Joints por Larsson et al., (2020) se llevó a cabo un sistema que facilita la creación de juntas personalizadas mediante una interfaz de modelado, en la que se identificaron diversas restricciones en la máquina de fresado CNC de tres

ejes que decidieron utilizar dado a su asequibilidad. Detectaron dos limitaciones importantes que estudiaron para obtener posibles soluciones y llegar a la medida más correcta.

Mayencourt & Mueller (2017) en su estudio desarrollan la optimización topológica en vigas de madera, mediante un proceso de fresado sustractivo CNC y un algoritmo de optimización, con el objetivo de reducir la cantidad de uso del material hasta un 50% de su peso original y hacer más eficiente su sistema. Sin duda, estas iniciativas son un gran aporte para fomentar un tipo de trabajo similar de optimización en otros elementos estructurales o constructivos como, por ejemplo, incorporar a los carpinteros de armar o de ribera en la industria 4.0

3. Métodos

3.1. Objetivo

La investigación busca evaluar las posibilidades geométricas de la máquina de fresado CNC de tres ejes para la fabricación de uniones carpinteras patrimoniales, y a su vez, determinar cuáles son las dificultades o restricciones transferibles al momento de utilizar este tipo de mecanizado.

Para esto, se debió subdividir el proceso en tres etapas dado a que hubo una adquisición de conocimientos de manera progresiva: una teórica, otra de inmersión previa y finalmente, la distinción de una variable a experimentar: la tolerancia de ingreso.

3.2. Revisión metodológica y elaboración de categorizaciones

La primera etapa requirió un trabajo a nivel teórico, con lectura de investigaciones aplicadas para contemplar y analizar los sistemas metodológicos empleados para desarrollar un estudio práctico. Dentro de este marco, se utilizaron como referencia investigaciones respecto al diseño con Frankel & Racine (2010) y la fabricación digital de uniones en madera con González Böhme et al. (2017) y también estudiado por Larsson et al. (2020).

Por otro lado, se abstraigo documentación respecto a uniones carpinteras patrimoniales de Valparaíso documentado por González Böhme y Maino Ansaldo (2019) y de Chiloé por Verdugo Bascuñán (2020), donde se clasificaron las ya preexistentes y se seleccionó un set de uniones a fabricar como prototipos.

Finalmente se elaboró una categorización de cinco máquinas Router CNC de tres ejes manufacturadas en Chile, con el objetivo de compararlas a partir de su accesibilidad en costo y sus características más fundamentales para la fabricación de uniones carpinteras. Esto consideró un trabajo de cotización a distintos agentes comerciales a fin de evaluar y presentar distintas opciones.

3.3. Inmersión previa

Entendiendo el trabajo experimental que requiere la investigación, se hizo una primera aproximación a una máquina Router CNC de tres ejes para entender a grandes rasgos su funcionamiento. Por un criterio de accesibilidad se utilizó una Router CNC, de marca Techno CNC modelo LC Series 4896, que se encuentra disponible en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo en la Universidad de Chile.

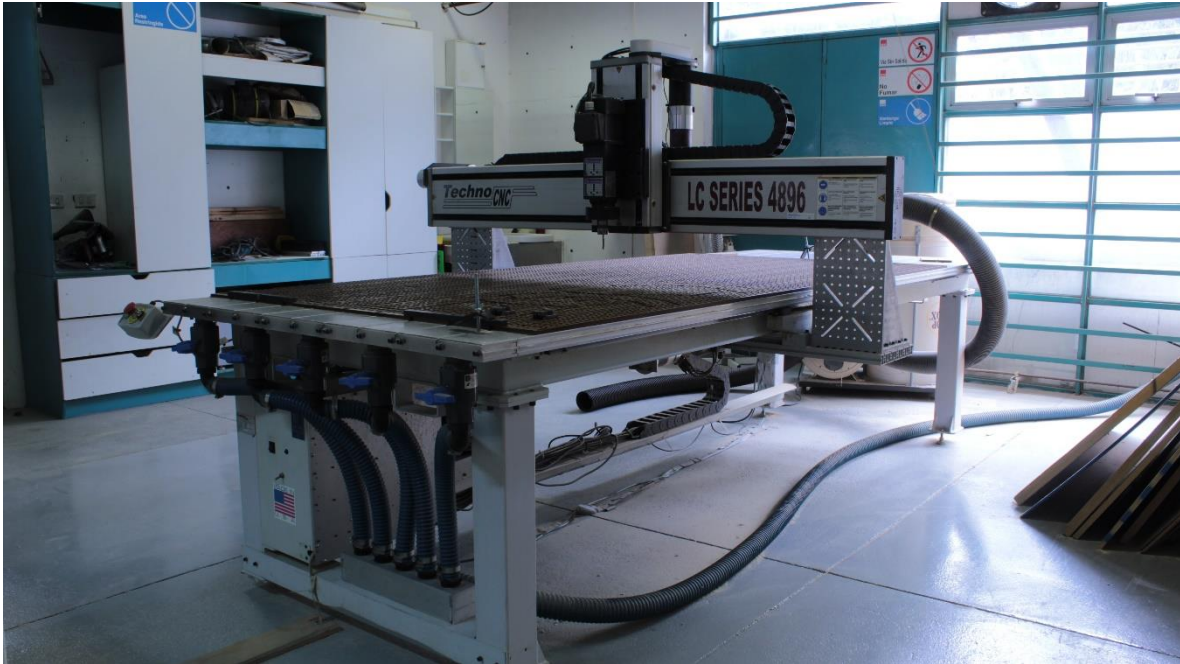


Figura 1: Router CNC LC Series 4896. Fuente: Elaboración propia.

La Router CNC LC Series 4896 opera mediante la interfaz Techno CNC entre el programa Rhinoceros 5 y el plugin RhinoCAM MILL 2014. Por esto, se comenzó a elaborar modelos digitales con distintos tipos de ensambles y empalmes posibles de fabricar en tres ejes, para verificar la factibilidad de su fabricación en consideración de los procedimientos necesarios para realizar cortes en cada pieza de madera.

Con el objetivo de familiarizarse con la madera, se llevó a cabo una inspección de maderas, esto para luego seleccionar las más adecuadas y adaptarlas a las características necesarias para fabricar piezas carpinteras. A partir de esto, se evidenció un desconocimiento práctico en la fabricación de piezas de madera estandarizadas, por lo que se realizó una capacitación dentro del taller de prototipos disponible en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile.

Estandarizadas las piezas de madera, se seleccionó una unión carpintera según el nivel de representación y uso habitual en las estructuras de madera patrimoniales, el ensamble cola de milano, con el fin de observar y sistematizar el proceso de elaboración de una pieza carpintera con la Router CNC a partir de su programación digital desde el computador hacia la máquina. En este ejercicio se jerarquizaron los hallazgos más pertinentes respecto a la configuración y calibración de la máquina al momento de fabricar un ensamble. La configuración consistió en cuatro pasos fundamentales:



Figura 2: Configuración y calibración de las uniones en la máquina Router CNC LC Series 4896.

Fuente: Elaboración propia.

- **Stock:** En el Box Stock se visualizó el estado del dibujo para verificar si son correctas las dimensiones pre-definidas y se creó un volumen teórico con las dimensiones seleccionadas: largo, ancho y alto.
- **Align:** Con el Align Stock se definió desde qué superficie comienza a ejecutarse el corte en el eje Z, que en este caso es desde arriba (Top), y la alineación del volumen en el eje XY en el centro (Center). Sin embargo, la alineación en el eje XY podría ubicarse en cualquier posición dado a que el dibujo no tiende a moverse por las dimensiones exactas establecidas en el Box Stock. Luego en el Set World C.S se seleccionó el volumen creado anteriormente en el Box Stock, la superficie cero en la altura más alta en Z y la posición cero desde donde se trabaja el corte de la unión, esta depende de la orientación establecida en el dibujo.
- **Machining Operations 2 Axis:** La mayoría de los cortes a ejecutar son perimetrales (Profiling) y de extracción interior de material (Pocketing). En esta sección se configuró la geometría de la unión, la fresa a utilizar, la dirección de corte, la profundidad de corte total que se puede definir por capas, las medidas de seguridad (Clearance plane) y las velocidades del motor con la herramienta. Finalizado el procedimiento, se generó la forma de corte y se creó un archivo.
- **Techno CNC Interface:** El archivo se subió a la interface, el cual se pre-procesa para obtener el tiempo que toma en fabricarse el corte, y luego se comenzó a trasladar la fresa hacia el punto de coordenadas cero, definido en el segundo paso Set World C.S, y finalmente se conforman todas las coordenadas en (0,0,0) para darle paso a la Router a cortar.

3.4. Criterios de fabricación de uniones

Es necesario tener en cuenta el corte máximo de profundidad dado por las fresas disponibles y por la altura del puente de la máquina. En el estudio, las fresas disponibles en el taller alcanzaban un corte hasta de 65 mm lo cual permitió y limitó cortar secciones de 2"x3" a 2"x6", siendo el espesor de las piezas de aproximadamente 40-50 mm. Con esos datos ya definidos, se estableció el largo

de las piezas acorde a dos zonas: una donde se trabajaría el corte de la unión y otra donde se ubicarían las respectivas perforaciones para fijar las maderas con tornillos al tablero de MDF ubicado sobre la superficie de trabajo de la máquina.

Claro lo anterior, se dibuja un rectángulo teórico en 2D en el programa Rhinoceros considerando las medidas pre-establecidas para contemplar el área total de cada pieza a trabajar. Las dimensiones del rectángulo fueron de 65 mm de ancho y 230 mm de largo, este último considera las dos zonas mencionadas anteriormente, una para la unión y otra para las perforaciones. Al elaborar la geometría de cada unión, se modificó sus esquinas interiores dado a que la morfología de la fresa no permite hacer ángulos rectos. La fabricación de uniones carpinteras a partir de un mecanizado de control computarizado distingue una serie de condicionantes o restricciones que se deben tomar en cuenta posterior a la hora de fabricar los prototipos. Es por esto, que se realizó un cuadro que ordena estas variables y señala las que son transferibles para cualquier persona o las que son condicionantes propias.

Tabla 1: Criterios de fabricación de uniones carpinteras. Fuente: Elaboración propia.

Condicionantes Restricciones	Criterios de fabricación	Herramientas	Condicionante propia o transferible
Movilidad de la máquina en tres ejes: X, Y y Z	Uniones posibles de fabricar en tres ejes	Máquina Router CNC y software de modelado	Transferible
Restricción en la fabricación de ángulos rectos por la morfología de la fresa	Adaptación de las esquinas interiores rectas a curvas	Geometría determinada por su diámetro	Transferible
Disponibilidad de fresas con corte máximo de profundidad de 65 mm	Maderas con dimensiones entre 2"x3" a 2"x6"	Fresas de diámetro 9.4 mm y 12.7 mm	Propia
Fijación de los listones a la superficie de trabajo mediante tornillos y un tablero	Definir una zona para las perforaciones dentro del listón de madera	Taladro, broca de 4 mm, punta phillips y tornillos de 60 mm	Propia
Distinguir si la unión trabaja el contacto y fricción	Se requiere considerar una tolerancia de ingreso	Máquina Router CNC y software de modelado	Transferible
Uso temporal de las herramientas y de la máquina según disponibilidad	Horarios determinados por la FAU mediante solicitud de horas de trabajo en la Router CNC y de herramientas anexas	Facilitadas por los laboratorios de la facultad (prensas, taladro, máquinas de corte, etc..)	Propia

3.5. Variable experimental

La primera prueba de fabricación de un ensamble arrojó una serie de interrogantes y observaciones al momento de configurar el archivo y en el proceso de corte. Éstas fueron fundamentales a la hora de determinar el foco de la investigación aplicada. Acorde a las anotaciones del primer prototipo, se repitió la fabricación del ensamble hasta obtener cinco variantes del mismo en distintas medidas. El número de variantes se definió respecto a la forma resultante a la hora de efectuar el encuentro, por lo tanto, el resultado solo se podía visualizar al momento de estar las dos piezas listas físicamente y unir las entre sí. Cada variante poseía fallas y afirmaciones, las cuales se utilizaron de manera complementaria para lograr el resultado final más óptimo.

En los cinco prototipos se observó de manera predominante una variable y desde ese hallazgo se definió el eje central de experimentación: la tolerancia de ingreso. Utilizando como base los resultados finales de los primeros cuatro prototipos, se desencadenó una serie de fabricación de uniones para testear en distinta medida los tipos de encuentro: ensamble y empalme. Estas fabricaciones de diversas uniones según su tipo de encuentro fueron a modo de comprobar datos numéricos en torno a la tolerancia de ingreso y contemplar si esta debía ser modificada conforme a otras variables tales como el tipo de madera, la dirección de la fibra, el tipo de encuentro y el estado de la madera.

La mayoría de los prototipos se trabajaron con pino radiata seco dado a que su venta es predominante y asequible dentro de Santiago. Sin embargo, se gestionó el envío de maderas chilotas para probar los distintos tipos de madera y adicionalmente, considerar que el uso y elaboración de las uniones carpinteras se concentra en la zona sur con maderas nativas. También es necesario mencionar que el estado exacto de las maderas era desconocido dado a que su obtención fue a través de aserraderos, lugares de recolección habitual de madera para un carpintero chilote, y no mediante venta con datos técnicos, por lo tanto, las observaciones obtenidas en este estudio son de carácter aproximado y no regularizado.



Figura 3: Variables a estudiar en torno a la tolerancia de ingreso. Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

4.1. Categorización

Existen uniones que físicamente trabajan una o dos variables de manera simultánea, que son: el contacto y la fricción. Estas variables se dan según si las piezas se posan una sobre la otra (contacto) o si las piezas al intersectarse producen roce entre sus caras (fricción). En el caso de que la unión cuente con ambas, se debió considerar una tolerancia de ingreso, dado a que cuando la madera se somete a corte, ésta desprende una textura astillosa que no permite el paso de las piezas entre sí.

En base a lo anterior, se abstrajo la información ya documentada de uniones carpinteras de Valparaíso por Böhme & Ansaldo (2019) y Chiloé por Verdugo (2020), donde se clasificaron respecto a si se podían fabricar en tres ejes y se seleccionaron las cuatro más representativas en términos de su tipo de encuentro, uso estructural, los esfuerzos que trabajan y si poseen contacto y fricción.

Tabla 2: Uniones seleccionadas para elaborar prototipos. Fuente: Elaboración propia.

Uniones Seleccionadas	Tipo de encuentro	Secciones aproximadas	Contacto y fricción	Uso estructural	Esfuerzos
Media madera en cruz oblicua	Ensamble oblicuo	2"x3" ~ 2"x4"	Sí	Sistemas arriostrados	Compresión y tracción
Media cola de milano	Ensamble perpendicular	2"x4" ~ 2"x6"	Sí	Envigado de piso y de cielo	Tracción
Rayo de júpiter	Empalme continuo	2"x4" ~ 2"x8"	Sí	Extensión de vigas	Compresión, tracción y flexión
Caja y espiga unilateral	Ensamble de esquina	2"x4" ~ 4"x4"	Sí	Elementos verticales	Compresión



Figura 4: Ensamble media madera en cruz oblicua. Fuente: Elaboración propia.

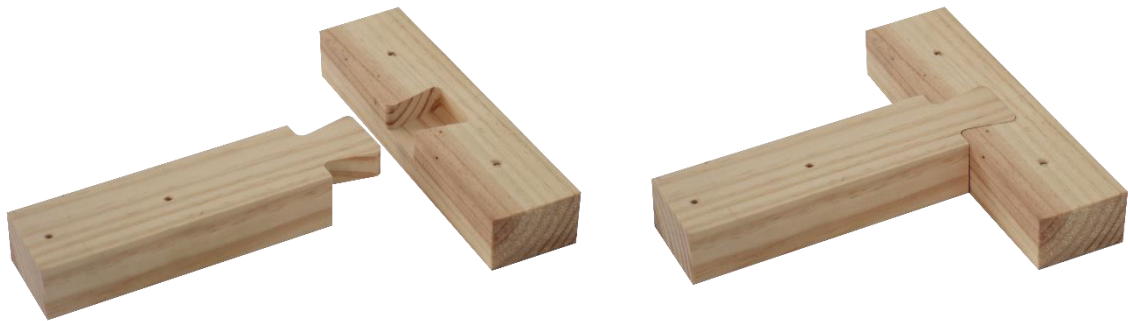


Figura 5: Ensamble media cola de milano. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6: Empalme rayo de júpiter. Fuente: Elaboración propia.



Figura 7: Ensamble caja y espiga unilateral. Fuente: Elaboración propia.

La categorización se hizo con todas las uniones documentadas en los textos señalados anteriormente, el trabajo completo se puede encontrar al final del documento en el anexo número 1. De este mismo, se recogieron datos en relación a la fabricación de uniones carpinteras patrimoniales. Los criterios que determinaron la factibilidad de fabricación en tres ejes fue en base al ingreso de la unión en una sola dirección con dos piezas, ya sea desde el canto, cara o testa del listón de madera; y también, por la restricción de ángulos rectos o ángulos que no sean posibles de alcanzar por la Router CNC LC Series 4896. Como, por ejemplo, se modificaron las esquinas interiores en cada una de las piezas del ensamble media cola de milano y empalme rayo de júpiter a esquinas curvas para poder fabricarlas; en el caso de la caja y espiga unilateral, se modificaron solo las esquinas interiores de una pieza, la caja, para el ingreso de la otra: la espiga.

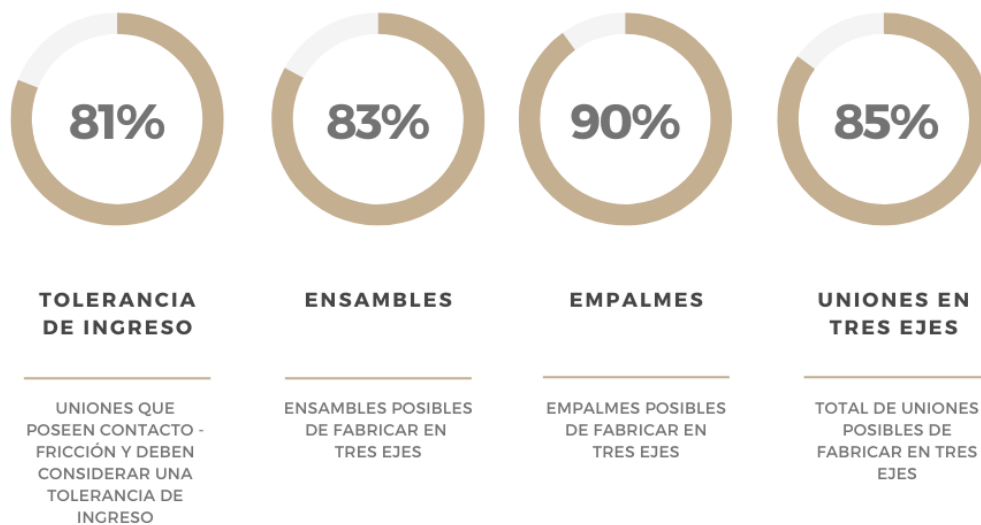


Figura 8: Variables en relación a la fabricación de uniones en tres ejes. Fuente: Elaboración propia.

Al mismo tiempo, se elaboró una categorización de cinco mecanizados Router CNC de tres ejes donde la búsqueda se reduce a maquinarias fabricadas en Chile, ya que conseguir máquinas importadas requiere más trabajo en su inversión y acceso; además, se contempla la viabilidad de inversión por medio de un agente que trabaje a nivel local, como un carpintero que desee implementar manufactura avanzada a su oficio. Los elementos a considerar en la categorización se dieron a partir de las necesidades que se fueron identificando a medida que se manipulaba la Router CNC LC Series 4896, exceptuando el precio que es por criterios de accesibilidad.

Tabla 3: Categorización máquinas Router CNC elaboradas en Chile. Fuente: Elaboración propia.

Equipo Router CNC	Valor	Área de trabajo (X, Y y Z)	Tipo de mesa	Profundidad máxima de corte	Potencia del motor	Altura puente	Tipo de estructura	Grado de transporte (peso – dimensión)	Uso
La artesana ECUT	\$3.116.523	600x900x105 mm	Ranura T-Slot	50 mm	1,5 KW	105 mm	Sobremesa de acero	Compacta 120 kg Trasladable	Local
FácilCNC M-120	\$5.990.000	1200x1200x110 mm	No tiene (tablero)	100 mm	2,2 KW	110 mm	Perfiles de acero	Amplia 130 kg Estacionaria	Industrial
Router CNC LD Cimech 3D	\$2.589.990	1000x1000x70 mm	Ranura V-Slot tipo C	50 mm	3.36V 2.8A	70 mm	Perfiles de aluminio	Compacta 78,3 kg Trasladable	Local
Router CNC TodoCortes	\$3.990.000	600x900x200 mm	Ranura T-Slot	50 mm	3,2 KW	200 mm	Perfiles de acero	Compacta - Estacionaria	Semi-industrial
Router ER-1325 ECUT	\$8.782.216	1300x2500x200 mm	Ranura T-Slot	100 mm	3,2 KW	200 mm	Hierro fundido y perfiles de acero	Amplia 1300 kg Estacionaria	Industrial

Las relaciones que se identificaron fueron principalmente en torno a la profundidad máxima de corte, que va subordinada según la potencia del motor, la altura del puente y la fresa a utilizar, que, en ese mismo orden, sería una relación de velocidad, movilidad máxima en el eje Z y la herramienta de corte. Desde el punto de vista del material, la madera posee una cierta rigidez que somete a la fresa a una determinada exigencia cuando realiza cortes, por lo que idealmente se deberían utilizar fresas no menores de 10 mm aproximadamente, esto también para evitar riesgos de rotura de la herramienta. En cuanto al largo de la fresa, el criterio se establece de acuerdo al espesor de la madera seleccionada.

Por otro lado, se consideró el grado de transporte que está condicionado por el tipo de estructura y su materialidad empleada que, generalmente, tienden a ser estructuras metálicas que brindan estabilidad y un peso más liviano. También se contempló el formato de la máquina en sus dimensiones, ya que esto en conjunto del peso, indican el nivel de dificultad de transportar la máquina; esto claro, en vista de emplear o situar la máquina en dos escenarios distintos: de forma estacionaria en un taller o movilizarla constantemente a terreno.

El tipo de mesa y su área de trabajo establecieron criterios respecto a la forma en que se fijan los elementos a trabajar dentro de la superficie, esto es más restrictivo a la hora de trabajar tableros, pero con listones de madera no supone mayor problema dado a que se trabajan pequeñas secciones. Sin embargo, la dificultad podría estar en listones de madera muy largos en máquinas compactas con áreas de trabajo que no puedan sostener el total, para ello habría que seleccionar máquinas de dimensiones amplias o construir otros soportes para sostener el largo total del listón, como por ejemplo una mesa. En esta investigación se hicieron prototipos a una escala de muestra y la forma de fijación fue perforando las maderas y atornillando las piezas a una mesa de sacrificio, utilizando un tablero de MDF clavado sobre la mesa.

4.2. Prototipos

La primera prueba de fabricación de uniones, un ensamble cola de milano en una dirección de fibra, distinguió errores respecto a su tolerancia de ingreso ya que se utilizó una tolerancia de 2 mm y al momento de encajar ambas piezas quedaba demasiada holgura y no cumplía su función de manera correcta (Figura 9). En un segundo intento se corrige la tolerancia a 0.3 mm, sin embargo, las curvaturas interiores no concordaban con el diámetro de la fresa de 9.4 mm que se empleó debido a que en el dibujo eran más estrechas y se tomó como referencia una fresa de 6.4 mm aproximadamente, el ingreso se fuerza y el conjunto se vuelve indesarmable (Figura 11.1). En la tercera y cuarta prueba se fabricaron dos uniones con distintas tolerancias una con 0.5 mm y luego de ver el resultado de la primera, otra con 0.2 mm, ya que en la primera se distinguió un desarme fácil entre ambas piezas por su holgura (Figura 10). En cambio, la unión fabricada con tolerancia de ingreso de 0.2 mm opuso más resistencia al desarme y solo se deslizaba 1 mm en el sentido en respuesta a la tracción que es normal en el tipo de unión cola de milano (Figura 12). Por último, se fabrica una quinta unión con 0.1 mm de tolerancia y las piezas no ingresan (Figura 11.2)



Figura 9: Ensamble cola de milano prototipo 2 mm | Desplazamiento a tracción de 15 mm.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10: Ensamble cola de milano prototipo 0.5 mm | Desplazamiento a tracción de 3 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 11: 1. Ensamble cola de milano prototipo 0.3 mm curvaturas interiores estrechas |
2. Ensamble cola de milano prototipo 0.1 mm no ingresa. Fuente: Elaboración propia.



Figura 12: Ensamble cola de milano prototipo 0.2 mm ingreso eficaz | Desplazamiento a tracción de 1 mm.
Fuente: Elaboración propia.

Dado al resultado final, se planteó comprobar la tolerancia de ingreso de 0.2 mm en otras morfologías, para verificar si funcionaba esta tolerancia en otros modelos o si era necesario modificarla según su tipo de encuentro: ensamble o empalme.

Se probó en los ensambles quijera y en media madera en cruz, dado a que los dos contaban con gran contacto y fricción entre las caras de cada pieza (Figura 13 y 14). El resultado fue eficaz y se comprobó que la tolerancia 0.2 mm es aplicable en uniones de tres ejes con las características mencionadas anteriormente. Por otro lado, se analizaron dos empalmes que son el pico de flauta y el rayo de júpiter donde a ambos se les aplicó tolerancia de ingreso 0 dado a que solo trabajaban el contacto (Figura 15 y 16), el resultado del empalme pico de flauta fue concordante a la teoría, sin embargo, con el rayo de júpiter todas sus caras no lograban encontrarse de manera correcta y se generaba un leve desplazamiento entre las piezas. Dado a este hallazgo, se fabricaron dos rayos de júpiter uno con tolerancia 0.1 mm y otro con tolerancia 0.2 mm y en el último el calce fue eficiente (Figura 17).



Figura 13: Ensamble quijera prototipo tolerancia 0.2 mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 14: Ensamble media madera en cruz prototipo tolerancia 0.2 mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 15: Empalme pico de flauta prototipo tolerancia 0 mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 16: Empalme rayo de júpiter prototipo tolerancia 0 mm | Desfase en las caras y piezas.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 17: Empalme rayo de júpiter prototipo tolerancia 0.2 mm | Contacto y fricción eficaz.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Prototipos tolerancia de ingreso en pino radiata seco. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de encuentro	Dirección de la fibra	Tipo de madera	Estado de la madera	Tolerancia de ingreso 2 mm	Tolerancia de ingreso 0.5 mm	Tolerancia de ingreso 0.3 mm	Tolerancia de ingreso 0.2 mm	Tolerancia de ingreso 0.1 mm	Tolerancia de ingreso 0 mm
Ensamble cola de milano	Continúa, una dirección	Pino radiata	Seco	Holgura amplia, desplazamiento a tracción: 15 mm	Desarme fácil por la holgura, desplazamiento a tracción: 3 mm	Curvaturas estrechas, no se puede desarmar	Ingreso eficaz y oposición al desarme, desplazamiento a tracción: 1 mm	No ingresa	-
Ensamble quijera	Continúa, una dirección	Pino radiata	Seco	-	-	-	Ingreso eficaz y oposición al desarme, no hay desplazamiento	-	-
Ensamble media madera en cruz	Perpendicular dos direcciones	Pino radiata	Seco	-	-	-	Ingreso eficaz y oposición al desarme, desplazamiento de 1 mm	-	-
Empalme pico de flauta	Continúa, una dirección	Pino radiata	Seco	-	-	-	-	-	El contacto es eficaz
Empalme rayo de júpiter	Continúa, una dirección	Pino radiata	Seco	-	-	-	El contacto y fricción es eficaz	Desfase en las piezas de madera 1.5 mm	Desfase en las caras de la unión 1mm y en las piezas 3 mm
Ensamble media cola de milano	Perpendicular dos direcciones	Pino radiata	Seco	-	-	-	Ingreso eficaz pero posee un levantamiento en la otra cara de 1.5 mm	No ingresa por la tolerancia y diferencia en las curvas	-
Ensamble media cola de milano	Continúa, una dirección	Pino radiata	Seco	-	-	Ingreso eficaz y desarme ligeramente más fácil	Ingreso eficaz y oposición al desarme, posee más firmeza	-	-

Por otro lado, se hicieron pruebas a nivel geométrico de dos ensambles dado a que poseían mayor complejidad en la morfología de ensamblaje y en su fabricación más allá de la tolerancia de ingreso. Estos fueron el ensamble caja y espiga unilateral donde se desarrollaron una serie de espigas en torno a una caja; y el ensamble media madera en cruz oblicua donde el trabajo se enfocó en hallar la distancia angulada correcta.

Tabla 5: Caja y espiga unilateral, estudio de espigas en torno a una caja. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de encuentro	Dirección de la fibra	Tipo de madera	Estado de la madera	Espiga 1 (X, Y y Z)	Espiga 2 (X, Y y Z)	Espiga 3 (X, Y y Z)	Espiga 4 (X, Y y Z)	Espiga 5 (X, Y y Z)
Caja y espiga unilateral	Perpendicular, dos direcciones	Pino radiata	Seco	X: 32.5 mm Y: 41 mm Z: 25 mm No ingresa	X: 31 mm Y: 40 mm Z: 26 mm Holgura amplia	X: 32 mm Y: 39 mm Z: 25 mm Holgura amplia	X: 32.5 mm Y: 40 mm Z: 25 mm Holgura de 0.5 mm en su ancho	X: 33 mm Y: 40 mm Z: 25 mm Ingreso eficaz

La caja poseía dimensiones en su ancho, largo y alto (X, Y y Z) de 32.9 mm, 40 mm y 25 mm, por lo que en la serie de espigas se distinguieron diferencias milimétricas entre una y otra. En el caso de la espiga uno y tres hubo diferencias en sus largos por 1 mm, que en la primera no permitió el ingreso de la espiga y en la tercera la espiga quedaba con holgura. Desde la espiga uno a la cuatro se tomaron en consideración las diferencias y se llegó a la espiga número cinco con buen ingreso y oposición al desarme.

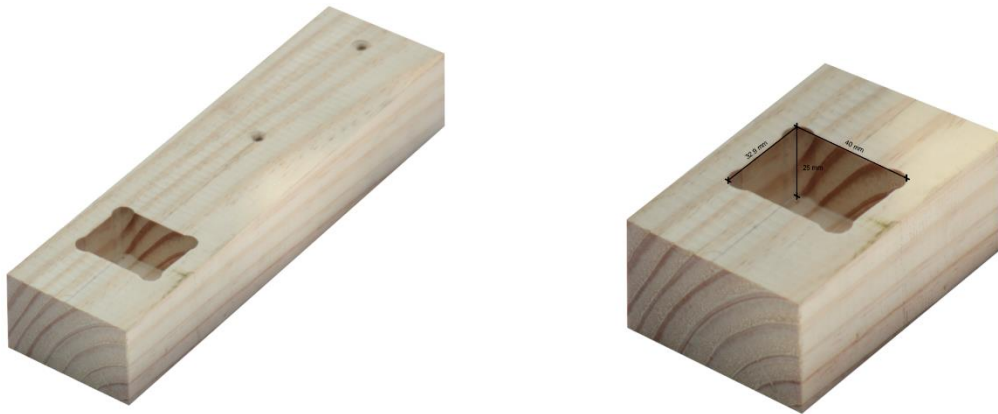


Figura 18: Dimensiones (X Y y Z) de la pieza caja del ensamble caja y espiga. Fuente: Elaboración propia.

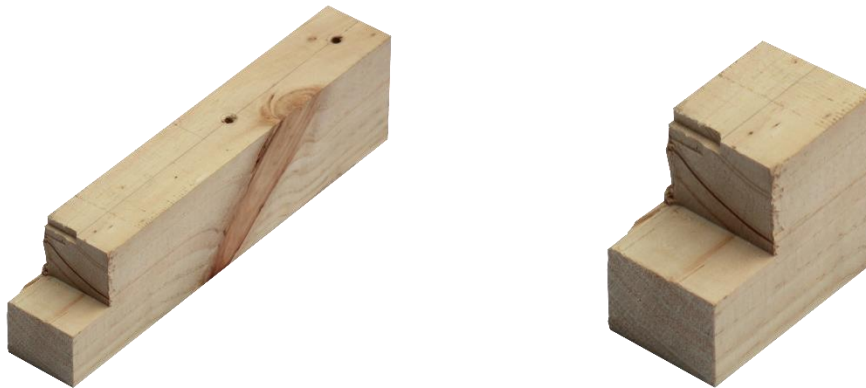


Figura 19: Detalle espiga 1 | No ingresa a la caja. Fuente: Elaboración propia.



Figura 20: Ensamble caja y espiga unilateral | Detalle espiga 2 | Detalle ensamblaje.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 21: Ensamble caja y espiga unilateral | Detalle espiga 3 | Detalle ensamblaje.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 22: Ensamble caja y espiga unilateral | Detalle espiga 4 | Detalle ensamblaje.
Fuente: Elaboración propia.

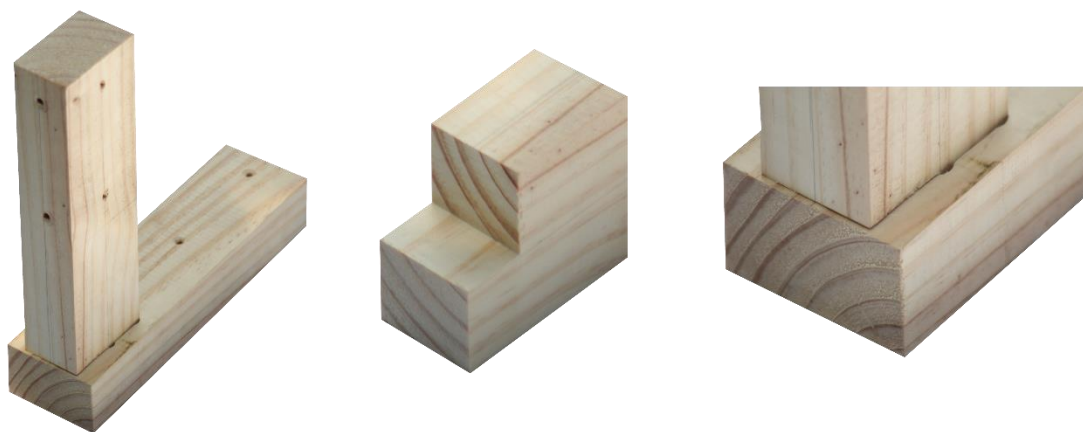


Figura 23: Ensamble caja y espiga unilateral | Detalle espiga 5 | Detalle ensamblaje.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que en esta serie de espigas se definió un sentido distinto de corte en la espiga respecto a su dirección en el eje Z, ya que requirió fijar la pieza desde la superficie del canto y no desde la cara como se hizo en la mayoría de los prototipos realizados en esta investigación. Esto porque en el caso de aplicarse el corte en el sentido de la cara, habría contemplado una curvatura interior y no el ángulo recto que se buscaba obtener para el buen funcionamiento del conjunto.

Para el segundo ensamble, media madera en cruz oblicua, se requirió considerar la distancia de manera perpendicular al ángulo para que el ingreso fuera eficaz, lo cual se deslumbra en el primer caso donde la distancia se toma de manera paralela al ancho y el ingreso no es posible.

Tabla 6: Media madera en cruz oblicua, estudio de la distancia angulada. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de encuentro	Dirección de la fibra	Tipo de madera	Estado de la madera	Media madera 1 distancias	Media madera 2 distancias	Media madera 3 distancias
Media madera en cruz oblicua	Oblicua, dos direcciones	Pino radiata	Seco	Distancia ancho: 65 mm Distancia ángulo: 59 mm No ingresa	Distancia ancho: 70 mm Distancia ángulo: 63 mm No ingresa	Distancia ancho: 72 mm Distancia ángulo: 65 mm Ingreso eficaz

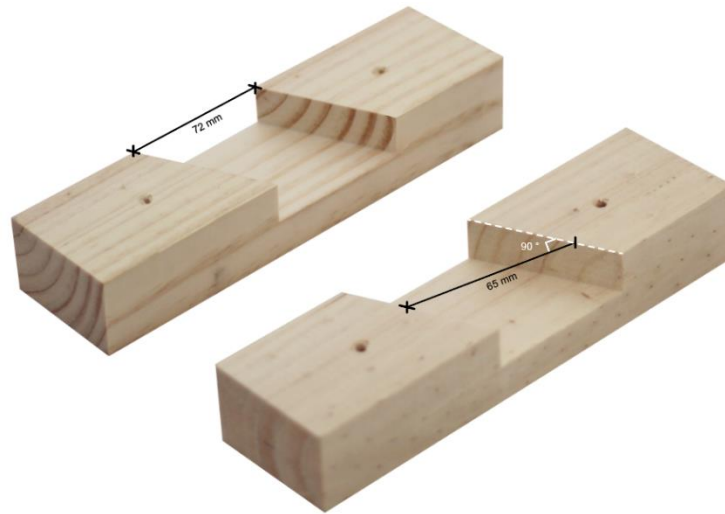


Figura 24: Esquema de distancias en su ancho y de forma perpendicular al ángulo.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7: Prototipos tolerancia de ingreso con madera nativa en diferentes estados.
Fuente: Elaboración propia.

Tipo de encuentro	Dirección de la fibra	Tipo de madera	Estado de la madera	Tolerancia de ingreso 0.2 mm	Tolerancia de ingreso 0.1 mm	Tolerancia de ingreso 0 mm
Ensamble media cola de milano	Continúa, una dirección	Canelo	Semi-húmedo	Holgura amplia, desplazamiento a tracción: 2 mm	Holgura amplia, desplazamiento a tracción: 3 mm	-
Ensamble media cola de milano	Continúa, una dirección	Mañío	Seco	-	Ingreso eficaz y oposición al desarme, no hay desplazamiento	Ingreso eficaz y mayor oposición al desarme, no hay desplazamiento
Ensamble media cola de milano	Continúa, una dirección	Coigüe	Húmedo	-	Ingreso eficaz, desplazamiento a tracción: 2 mm	Ingreso eficaz, desplazamiento a tracción: 1 mm



Figura 25: Ensamble media cola de milano prototipo en canelo con tolerancia 0.2 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 26: Ensamble media cola de milano prototipo en canelo con tolerancia 0.1 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 27: Ensamble media cola de milano prototipo en mañío con tolerancia 0.1 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 28: Ensamble media cola de milano prototipo en mañío con tolerancia 0 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 29: Ensamble media cola de milano prototipo en coigüe con tolerancia 0.1 mm.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 30: Ensamble media cola de milano prototipo en coigüe con tolerancia 0 mm.
Fuente: Elaboración propia.

Las maderas en estado húmedo y semi-húmedo contemplaron deformaciones al pasar de los días respecto a su albura y vellosidades producidas por el corte. El canelo comenzó a secarse y aumentó el tamaño de las grietas de su albura y en el caso del coigüe con tolerancia 0, las piezas ingresaban solo hasta la mitad por las vellosidades, pero estas se comprimieron al perder agua en su composición y permitieron el ingreso completo del ensamble, pero con una holgura que está en constante crecimiento dado al estado húmedo de la madera en proceso de secado.



Figura 31: Detalle rotura y crecimiento de las grietas de la albura en el canelo semi-húmedo.
Fuente: Elaboración propia.

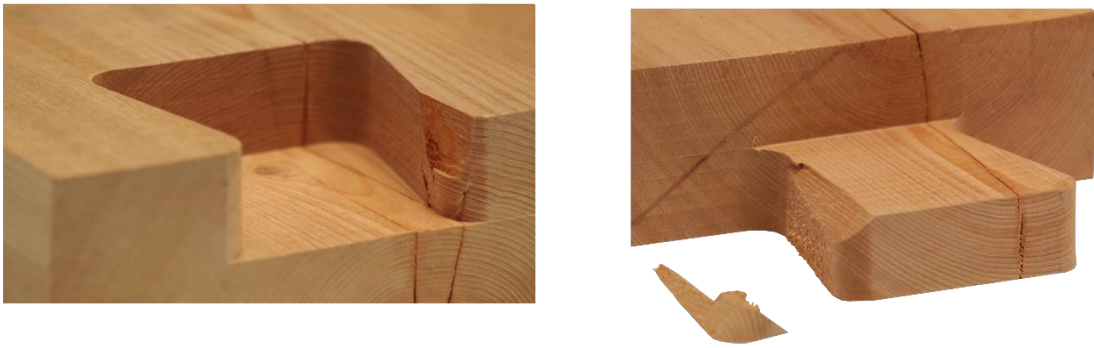


Figura 32: Detalle desprendimiento de fragmentos en el mañío seco. Fuente: Elaboración propia.



Figura 33: Detalle de las grietas en el coigüe húmedo en proceso de secado.
Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

La investigación en términos generales comprobó que se puede fabricar la mayoría de uniones carpinteras patrimoniales en una Router CNC de tres ejes, en la cual se evaluaron distintas geometrías y condiciones en el material que comprendieron tres hallazgos importantes en relación a la máquina y la fabricación de uniones:

Las máquinas Router CNC de tres ejes no restringen el uso de diferentes estados en la madera, lo cual facilita la obtención de cualquier tipo de madera independiente de su estado ya que no es necesario un requerimiento específico de su condición; al testear maderas nativas en Chiloé también nos indica que las máquinas Router CNC de tres ejes si se podrían integrar al oficio carpintero chilote. Es necesario mencionar y tener en consideración que las maderas en estado húmedo y semi-húmedo corren el riesgo de deformación y que, por consecuencia, se modifican las dimensiones y estructura de la unión.

Los cambios geométricos en las uniones apuntan fundamentalmente en la incapacidad de la máquina de fabricar ángulos rectos interiores que se reemplazan por curvas que distinguen un cambio en la geometría de la unión, pero en menor medida. La reproducción de la mayoría de las uniones es sencilla, ya que principalmente las uniones involucran la intersección entre dos piezas donde el tiempo de fabricación con la máquina, no requiere largas horas de trabajo; en geometrías simples toma entre 5 a 10 minutos por pieza y las más complejas entre 15 a 30 minutos por pieza aproximadamente.

La tolerancia de ingreso fluctúa principalmente entre dos variables: el tipo de madera y el tipo de encuentro; en el caso de las maderas nativas, éstas tienden a requerir entre 0.1 mm y 0 mm de tolerancia de ingreso en los ensambles, contrario al pino radiata que generalmente requiere un mínimo de 0.1 mm y un máximo de 0.3 mm según la morfología del ensamble, ciertamente se distinguen mejores resultados aplicando 0.2 mm de tolerancia en la mayoría de los ensambles, pero depende del caso. También existen uniones particulares que en pino radiata no requieren tolerancia de ingreso dado a su disposición geométrica, como la media madera en cruz oblicua y la caja y espiga unilateral. Respecto a los empalmes que al trabajar solo el contacto no suelen necesitar tolerancia de ingreso, aunque si hay excepciones como el rayo de júpiter.

Finalmente, se destaca que los oficios tradicionales integrados a la manufactura avanzada contemplan grandes oportunidades de crecimiento e incentivo en su aplicación habitual que, puede fomentarse desde el uso local hasta la industria 4.0 de manera asequible y promisorio. Por otro lado, se visualizan futuras investigaciones experimentando con diferentes tipos de madera, encuentros o analizar el comportamiento estructural de las uniones en respuesta a diversos esfuerzos como la compresión, tracción o flexión.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a Carlos Muñoz Técnico Mecánico del Laboratorio CNC en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile por su guía en el desarrollo de los prototipos en esta investigación y a Jaime López guía turístico de The Ancud y Costa Pacífico por la gestión y envío de las maderas nativas de Chiloé.

Referencias

- Berg Costa, L. (2007). Restoration in Chiloe (Chile): The Church of Castro. *Editorial Pontificia Universidad Javeriana*, 20(1), 126-141.
- Borrás, X. (2010, octubre 20). Desde la choza hasta la arquitectura de vanguardia del siglo XXI: Breve historia de la madera como material de construcción [Industria de la madera]. *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>
- CMN. (2014, mayo 31). Iglesias de Chiloé [Institucional]. *Consejo de Monumentos Nacionales de Chile*. <https://www.monumentos.gob.cl/patrimonio-mundial/lista-actual/iglesias-chiloe>
- Eversmann, P. (2019). Concepts for Timber Joints in Robotic Building Processes Introduction: Computational Development of Timber Structures and Joining Techniques. En M. Hudert & S. Pfeiffer (Eds.), *Rethinking Wood Future Dimensions of Timber Assembly* (p. 296). Birkhauser. https://www.researchgate.net/publication/334479738_Concepts_for_Timber_Joints_in_Robotic_Building_Processes_Introduction_Computational_Development_of_Timber_Structures_and_Joining_Techniques
- FácilCNC. (2022). *Sobre Nosotros* [Empresa]. <https://facilcnc.jumpseller.com/>
- Frankel, L., & Racine, M. (2010, julio 7). *The Complex Field of Research: For Design, through Design, and about Design*. Design and Complexity - DRS International Conference 2010, Montreal, Canada. <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2010/researchpapers/43>
- Friedman, K. (2000). *Creating design knowledge: From research into practice*. 114212 bytes. <https://hdl.handle.net/2134/1360>
- Garrigues. (2022, abril 3). ¿Para qué sirve una fresadora de metal? [Empresa]. *Mecanizados Garrigues*. <https://www.mecanizadosgarrigues.es/blog/para-que-sirve-una-fresadora-de-metal/>
- González Böhme, L. F., & Maino Ansaldo, S. (2019). *Uniones carpinteras de Valparaíso: La geometría de ensambles y empalmes*. RIL EDITORES.
- González Böhme, L. F., Quitral Zapata, F. J., Maino Ansaldo, S., & Hurtado Saldías, M. (2017). Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno em madera. *Blucher Design Proceedings*, 236-241. <https://doi.org/10.5151/sigradi2017-038>
- Larsson, M., Yoshida, H., Umetani, N., & Igarashi, T. (2020). Tsugite: Interactive Design and Fabrication of Wood Joints. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 317-327. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415899>
- Mayencourt, P., & Mueller, C. (2017). Structural Optimization and Digital Fabrication of Timber Beams. *IABSE Conference, Bath 2017: Creativity and Collaboration – Instilling Imagination and Innovation in Structural Design*, 153-154. <https://doi.org/10.2749/222137817821232856>

Pérez Barros, M. J. (2015, septiembre 16). Patrimonio sureño. *ED*. <https://www.ed.cl/estilo-de-vida/articulos/patrimonio-sureno/>

Roldán Tonioni, A. (2015). Los oficios tradicionales en la modernidad. *Revista Perspectivas: Notas sobre intervención y acción social*, 22. <https://doi.org/10.29344/07171714.22.448>

SNPC. (2020, abril 14). Aprobado ingreso de Carpintería de Ribera Tradicional de Los Lagos al Inventario de Patrimonio Cultural Inmaterial [Institucional]. *Servicio Nacional del Patrimonio Cultural*. <https://www.patrimoniocultural.gob.cl/noticias/aprobado-ingreso-de-carpinteria-de-ribera-tradicional-de-los-lagos-al-inventario-de>

Verdugo Bascuñán, V. (2020). *Uniones carpinteras: Tradición, técnica y cultura de un oficio* [Seminario de Investigación]. Universidad de Chile, FAU.

Webmaster. (2015, mayo 29). El MNBA valoriza la arquitectura sureña. *El Guillatún*. <https://www.elguillatun.cl/noticias/el-mnba-valoriza-la-arquitectura-surena>

Anexos

- Anexo 1: Categorización uniones carpinteras patrimoniales y máquinas Router CNC
- Anexo 2: Imágenes proceso de programación y calibración de la máquina
- Anexo 3: Vídeos e imágenes de fabricación de los prototipos

Todos los anexos están disponibles en la carpeta web:

https://drive.google.com/drive/folders/1_UKtRgQ0hbyj9doB2j2jVroA1ApYwhTq?usp=share_link