

Desarrollo de plataforma de producto modular basada en BIM, aplicada a viviendas multifamiliares de baja y mediana altura en madera

Developed of a modular product platform based on BIM, applied to multifamily mid-rise timber building

Mauricio Vargas-Mosqueda¹

Francisco Quítral Zapata²

Javier Sepúlveda-Morales³

Catalina Paredes⁴

Franco Benedetti⁵

Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile. mvgargas@ubiobio.cl

Universidad Técnica Federico Santa María, Concepción. Chile. francisco.quitral@usm.cl

Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile. lsepulveda@ubiobio.cl

Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile. Catalina.paredes1901@alumnos.ubiobio.cl

Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile. Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Concepción. Chile. fbenedet@ubiobio.cl

Autor de contacto: mvgargas@ubiobio.cl

RESUMEN

La construcción de edificaciones residenciales de baja y mediana altura en madera ofrece numerosas ventajas en términos de sostenibilidad. No obstante, su desarrollo en Chile requiere de la aplicación de métodos que optimicen tanto los procesos constructivos como la gestión integrada del proyecto. En función de lo anterior, en esta investigación se realizaron exploraciones para la implementación de una plataforma de producto modular basada en BIM. Se aplicó una metodología basada en Ciencias del Diseño, que permitió entender y definir el problema, para luego aproximarse a una solución que facilitó el modelamiento digital de diseños preexistentes a partir de módulos constituidos por componentes estandarizados. Para esto se usó un software BIM y software de programación paramétrica. El proceso permitió demostrar, en forma preliminar, que la plataforma propuesta puede ser una herramienta eficaz tanto para la optimización de los procesos de Diseño para la Manufactura y Ensamblaje, como para el modelado digital, de edificaciones residenciales de baja y mediana altura en madera.

Palabras clave: edificación en altura en madera; plataformas de producto; BIM; DfMA; automatización del diseño.

ABSTRACT

Low and mid-rise residential timber buildings offer numerous sustainability advantages. However, constructing such buildings in Chile requires methods that enhance the efficiency of industrialization and project development processes. This research explored implementing a modular product platform based on BIM, using a Design Science methodology. This approach facilitated understanding and defining the problem, leading to a solution for digitally model existing designs using modules made of standardized components. BIM software and parametric programming software were employed. The preliminary results demonstrated that the proposed platform could be an effective tool for optimizing Design for Manufacture and Assembly processes and digital modelling of multi-family low and mid-rise residential timber buildings.

Keywords: multi-family mid-rise timber buildings; products platforms; BIM; DfMA; design automation.

Cómo citar este artículo/Citation: Mauricio Vargas-Mosqueda, Francisco Quítral Zapata, Javier Sepúlveda-Morales, Catalina Paredes, Franco Benedetti (2025). Desarrollo de plataforma de producto modular basada en BIM, aplicada a viviendas multifamiliares de baja y mediana altura en madera. Informes de la Construcción, 77 (580): 7116. <https://doi.org/10.3989/ic.7116>

Copyright: © 2025 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Recibido/Received: 15/09/2024

Aceptado/Accepted: 01/07/2025

Publicado on-line/Published on-line: 23/01/2026

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Edificaciones residenciales en altura en madera

Siendo la madera quizás el único material existente hoy en día en el planeta que puede ser usado para construir edificaciones de mediana y gran altura con un balance carbono negativo [1], la construcción de edificaciones residenciales en altura en madera masiva se presenta actualmente como una extraordinaria opción sustentable.

Aunado a esto, gracias a los avances tecnológicos en el ámbito de la construcción en madera, estas edificaciones actualmente pueden ser producidas con un alto grado de prefabricación e industrialización, lo que permite alcanzar altos niveles de productividad en los procesos constructivos. Sin embargo, este enfoque implica un cambio de paradigma para el sector construcción, donde uno de los mayores desafíos se encuentra en la necesidad de desarrollar un riguroso proceso de diseño previo al inicio de la producción. Esto puede generar demoras en el tiempo de entrega de soluciones de diseño personalizadas. Como resultado, la tendencia predominante apunta a la implementación de soluciones repetitivas que no se adaptan a las condiciones propias del proyecto y el sitio, o bien a la aplicación de soluciones modulares estandarizadas que dificultan la flexibilidad de diseño. No obstante, el surgimiento de las plataformas de producto como método de diseño y construcción ofrece una alternativa prometedora para reducir esta brecha y mejorar la adaptación a las condiciones específicas de cada proyecto.

1.2. Construcción modular: estandarización vs flexibilidad de diseño

Entre los métodos de prefabricación aplicados en la construcción industrializada, la construcción a partir de módulos tridimensionales, trae importantes ventajas a nivel de productividad y sustentabilidad. El hecho de prefabricar grandes volúmenes de edificación, incluyendo instalaciones sanitarias, y terminaciones interiores y exteriores, permite alcanzar altos niveles de calidad y control de los procesos, así como altos niveles de productividad. Sin embargo, la estandarización y simplificación funcional y volumétrica que suelen darse a las soluciones modulares, traen como desventaja la rigidez y excesiva uniformidad de los diseños.

1.3. Las plataformas de productos basadas en BIM, como método avanzado de diseño y construcción

Los métodos modernos de diseño y construcción surgen hoy en día con la finalidad de optimizar y hacer más productivo el desarrollo de proyectos en el ámbito de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC)[2], [3].

Estos métodos permiten minimizar brechas entre los procesos de diseño y los procesos constructivos a partir de la aplicación de técnicas de diseño y construcción virtual (VDC) [4], BIM (Building Information Modeling) [5], y de diseño paramétrico [6] [7]. Estas se apoyan en softwares de diseño, ingeniería y manufactura, asistidos por computadora (CAD, CAE y CAM respectivamente) que permiten un enlace directo con procesos de manufactura avanzada, como la manufactura robótica y/o el control numérico computarizado (CNC).

En este contexto surgen las Plataformas de Productos (PP) basadas en BIM, como métodos de vanguardia [8,9,10] pensados como sistemas integrados que se encuentran enfocados al Diseño para la Manufactura y Ensamblaje (DfMA) de edificaciones. En otras palabras, pueden definirse como sets de componentes constructivos o elementos modulares, que poseen una representación virtual (basada en BIM) como “gemelo físico”. Estos componentes cuentan con interfaces claramente definidas, lo que permite diversas configuraciones y garantiza soluciones eficaces y eficientes. Además, ofrecen acceso a una amplia gama de productos y servicios, con un alto grado de control sobre la cadena de suministro, pudiendo ser fabricados por uno o múltiples proveedores. Su propósito en sí, es racionalizar los procesos de manufactura y ensamblaje de componentes para reducir la carga de mano de obra y al mismo tiempo flexibilizar el proceso de personalización [10].

Las metodologías de Diseño para la Manufactura y Ensamblaje (DfMA) en las cuales se centran estas plataformas, fueron inicialmente ideadas para el desarrollo de productos de manufactura y luego traídas al ámbito de la construcción industrializada. Estas se enfocan en llevar el mayor porcentaje de construcción a la fábrica bajo procesos altamente automatizados, con la finalidad de garantizar un mayor y mejor control de los procesos productivos, así como altos niveles de seguridad y salud laboral. Los métodos de DfMA se centran en el diseño de cada componente constructivo de la edificación tomando en cuenta sus procesos de manufactura “fuera de sitio”, transporte y ensamblaje “en sitio” [11, 12].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El problema de investigación se centró en la optimización de los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de edificaciones residenciales de baja y mediana altura en madera, con la finalidad de alcanzar altos niveles de productividad tanto en el desarrollo del proyecto como en la construcción. En consecuencia, se aplicó una metodología de Investigación en Ciencias del Diseño (DSR) que se centra en el desarrollo de soluciones a problemas reales mediante el diseño de artefactos [3,4]. De acuerdo a esto se definieron tres etapas para el desarrollo de la investigación: 1) estudio del problema, 2) desarrollo de la solución y 3) validación de la solución.

En la primera etapa se identificaron condiciones espaciales y posibilidades de modularización de edificaciones preexistentes manejadas como casos de estudio. A partir de esto se definen características de módulos y criterios de modularización que permitieron desarrollar una Plataforma de

Producto Modular (PPM) compuestas módulos y componentes constructivos en base a madera, modelados como objetos BIM con un LOD 300. En este procedimiento se usó el software AutoCad versión 2023, desarrollado por Autodesk, para generar la planimetría de los módulos y componentes constructivos, y luego el software Revit, versión 2023, de Autodesk, el cual permitió el modelado tridimensional de módulos y componentes, como objetos BIM.

Una vez desarrollada la PPM, se procedió a validar su efectividad a través de un primer ciclo de iteraciones enfocadas en lograr el diseño por configuración de casos de estudio consistentes en distintas tipologías de apartamentos preexistentes.

Luego de esto, en un segundo ciclo de iteraciones con casos de estudio preexistentes, se aplicaron métodos de automatización del diseño desarrollados a través del software paramétrico Rhinoceros 7 y Grasshopper 1.0.0007, con la finalidad de adaptar rápida y eficazmente el tamaño de los módulos a las condiciones de cada caso de estudio.

3. ESTUDIO DEL PROBLEMA: ANÁLISIS ESPACIAL DE EDIFICACIONES EN ALTURA EN EL CONTEXTO CHILENO

Con el objetivo de desarrollar una plataforma de producto modular que permita optimizar los procesos de diseño y construcción de edificaciones residenciales de baja y mediana altura en madera en Chile, se estudiaron inicialmente las tipologías funcionales mayormente usadas en el diseño de recintos de edificaciones residenciales en altura en el país independientemente de su materialidad y número de pisos. En este sentido, como primera etapa de este proceso se estudiaron 25 edificios ya construidos o proyectados sin construir (Tabla 1). Estos fueron tomados de catálogos de venta ofrecidos en el mercado inmobiliario chileno a través de internet. Como restricción de selección se consideró un valor de venta de los apartamentos en un rango entre 1.500 UF y 2600 UF (53.000 a 92000 € aprox.). Adicionalmente se consideró el año de construcción (a partir del año 2019) y la disponibilidad de la mejor información planimétrica accesible a través de la web.

Todas las edificaciones seleccionadas fueron diseñadas o construidas en hormigón y mamposte-
ría reforzada, siendo esta la materialidad más común en Chile para este tipo de edificaciones.

En base a esto se analizaron las distintas tipologías de apartamentos observadas, así como las tipologías de los recintos que los componen, como dormitorios, cocinas y salas de baño.

Tabla 1. 25 edificaciones en altura estudiadas en el contexto chileno.

Nº	Edificio	Año	Ubicación	Inmobiliaria	Pisos	Modelos de Aptos.	Costo (en UF)		Costo en USD
1	Edificio Brava	2019	Iquique	Mira Mar	28	11	desde	2588	107.919,60
2	Velas del Norte	2025	Antofagasta	Alterra	24	11	desde	2100	87.570,00
3	Edificio Baquedano	2022	Coquimbo	PY	13	4	desde	2105	87.778,50
4	Vista Uno Norte	2021	Viña del Mar	Alborada	25	9	desde	2397	99.954,90
5	Edificio Alessandri	2021	Viña del Mar	Alborada	16	9	desde	2246	93.658,20
6	Molinos de Santa Ana	2021	Villa Alemana	Alborada	3	7	desde	2229	92.949,30
7	Condominio Alto Mirador	2023	Valparaíso	RVC	17	8	desde	1827	76.185,90
8	Edificio Carmen	2021	Santiago	Brick	8	9	desde	2256	94.075,20
9	Edificio Mapocho	2021	Santiago	Brick	7	5	desde	2332	97.244,40
10	Edificio Tarapacá	2021	Santiago	Brick	8	7	desde	2430	101.331,00
11	Mirador Casona	2024	Santiago	Exxacon	16	8	desde	2306	96.160,20
12	Edificio El Parrón	2024	La Cisterna	CONVET	12	12	desde	2278	94.992,60
13	Edificio Trinidad Ramírez	2022	La Cisterna	RVC	14	12	desde	2029	84.609,30
14	Viva Zañartu	2021	Nuñoa	VIVA	13	5	desde	2297	95.784,90
15	Condominio Los Peumos	2020	Penco	PY	8	10	desde	2195	91.531,50
16	Edificio Las Araucarias	2021	Hualpén	AVB	12	10	desde	2472	103.082,40
17	Nueva Maipú	2022	Concepción	Aconcagua	21	9	desde	1747	72.849,90
18	Edificio Castellón	2023	Concepción	ISN	21	5	desde	2329	97.119,30
19	Edificio Rozas	2022	Concepción	PY	21	7	desde	2270	94.659,00
20	Edificio Heras	2023	Concepción	Vellatrix	15	15	desde	2415	100.705,50
21	Edificio Vivo Rengo	2024	Concepción	Vellatrix	17	6	desde	2185	91.114,50
22	Edificio New Cycle	2022	Concepción	Urbani	13	12	desde	2048	85.401,60
23	Condominio Origen	2020	Chiguayante	FG	9	10	desde	2552	106.418,40
24	Altos de Parque Norte	2025	Los Ángeles	Galilea	5	2	desde	2170	90.489,00
25	Cumbres del Retiro Sur II	2024	Los Ángeles	Galilea	5	2	desde	1660	69.222,00
				Total		205			

Fuente: elaboración propia

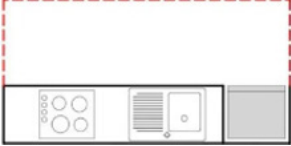
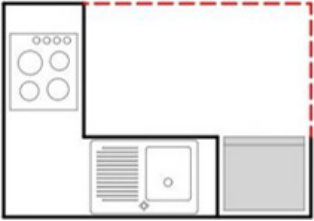
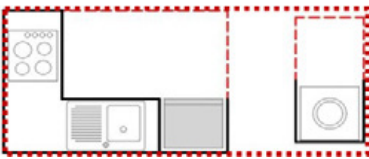
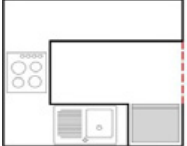
A partir de la información general e infografía proporcionada por la web, se identificaron y estudiaron 205 apartamentos, lo que incluyó, 205 cocinas y 280 salas de baño.

En forma preliminar, el análisis de los 205 apartamentos reveló que 99 correspondían a unidades de dos dormitorios (48,29%), mientras que 62 correspondían a apartamentos de un dormitorio (30,24%), 22 a apartamentos tipo estudio (10,73%) y 19 a apartamentos de tres dormitorios (9,26%), lo que evidencia una tendencia del mercado inmobiliario actual a preferir apartamentos de dos y un dormitorio, con este orden de prioridad.

En cuanto a los recintos se observó que los dormitorios son diseñados con una gran variedad de dimensiones y proporciones en planta, por lo que no fue posible distinguir alguna tipología o tamaño de superficie preferente en el diseño.

En cuanto a las cocinas se identificaron 6 tipologías de acuerdo a la configuración de planta y disposición del mobiliario (Tabla 2).

Tabla 2. Tipologías de cocinas en los 205 casos estudiados

	TIPOLOGÍA	PLANTA ESQUEM.	CANTIDAD	%
1	LINEAL		29	14,1%
2	LINEAL +		31	15,1%
3	EN L		33	16,1%
4	EN L +		33	16,1%
7	EN U		39	19,0%
8	EN U +		40	19,5%
	Total		205	100%

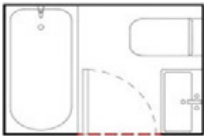
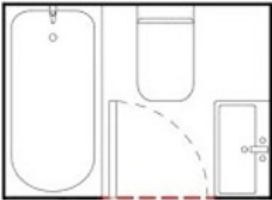
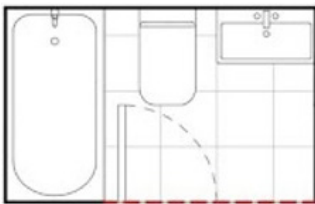
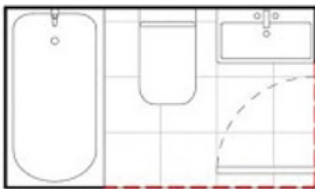
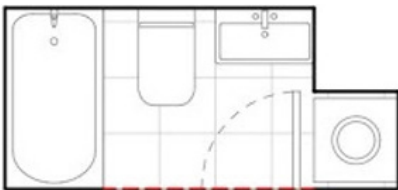
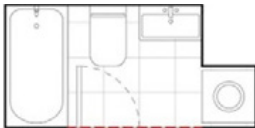
Fuente: elaboración propia

Con respecto a las salas de baño, se hizo el análisis en función de la disposición de las piezas sanitarias y de la configuración funcional en planta, observándose nueve tipologías distintas, de las cuales el 68,9% corresponden a una configuración lineal con ciertas variantes (Tabla 3).

4. DESARROLLO DE PLATAFORMA DE PRODUCTO MODULAR ADAPTABLE (PPM) COMO SOLUCIÓN

A partir del estudio del problema se identificaron y analizaron tipologías de recintos de cocinas y baños (Tablas 2 y 3) y las condiciones de diseño espacial de los apartamentos, con la finalidad de generar esquemas de modularización que permitieran configurar las tipologías de apartamento estudiadas de acuerdo a su diseño original. Este procedimiento se especifica en el apartado 4.2 correspondiente al sistema modular. Una vez definidos los módulos, se propone un sistema constructivo conformado por un set de componentes en madera (construidos en CLT, MLE y entramado ligero), y sus interfaces constructivas. Para ello se tomaron en consideración criterios de estandarización de productos y de procesos.

Tabla 3. Tipologías de baños en los 280 casos estudiados

		TIPOLOGÍA	PLANTA ESQUEM.	CANT.	%		
1		BILATERAL		8	2,9%		
2		RADIAL		62	22,1%		
3		RADIAL +		17	6,1%	Cant.	%
4	Lineal	L-1		55	19,6%	193	68,9%
6		L-2		30	10,7%		
8		L-3		50	17,9%		
5		L-1 +		29	10,4%		
7		L-2 +		11	3,9%		
9		L-3 +		18	6,4%		
			Totales	280	100,0%		

Fuente: elaboración propia

4.1. BIM y diseño automatizado

Para implementar la plataforma de producto modular se planteó un método de diseño por configuración en base a elementos constructivos modelados en BIM a través del software Revit 2023. Adicionalmente se planteó la aplicación de automatismos que facilitarían el proceso de diseño. Esto se hizo mediante el desarrollo de un algoritmo de automatización en Rhinoceros y Grasshopper, que permitieron la parametrización de las distintas tipologías de módulos y su adaptación dimensional de acuerdo a los requerimientos de diseño. La elección del software Grasshopper se debió, fundamentalmente, a que este ofrece una interfaz intuitiva y un flujo de trabajo flexible. Además el software es acompañado por una amplia comunidad, apoyada en recursos, tutoriales y soporte técnico de usuarios y desarrolladores. Asimismo ofrece una buena compatibilidad con Revit a través de plugins.

4.2. Sistema modular

Para la PPM se propone un sistema modular compuesto por: a) Módulos estandarizados de cocinas y baños (pods); b) Módulos multiespaciales adaptables; c) Componentes modulares de cerramiento:

El tamaño y las configuraciones funcionales de los módulos se definieron en función de las tipologías y los rangos dimensionales detectados en el estudio del problema.

a) Pods de baños y cocinas: Estos consistieron en pequeños módulos tridimensionales estandarizados con alto nivel de prefabricación.

De acuerdo al estudio del problema se crearon los siguientes módulos (Figura 1):

- Pod de baño lineal, con medidas interiores estandarizadas de 1.30 m. x 2.40 m.
- Pod de cocina lineal, con medidas interiores estandarizadas de 1.50 m. x 2.70 m.
- Pod de cocina en “L” con medidas interiores de 2,10 m. x 2.65 m.
- Módulo con dos baños agrupados longitudinalmente.
- Módulo de baño más cocina lineal, agrupados longitudinalmente.

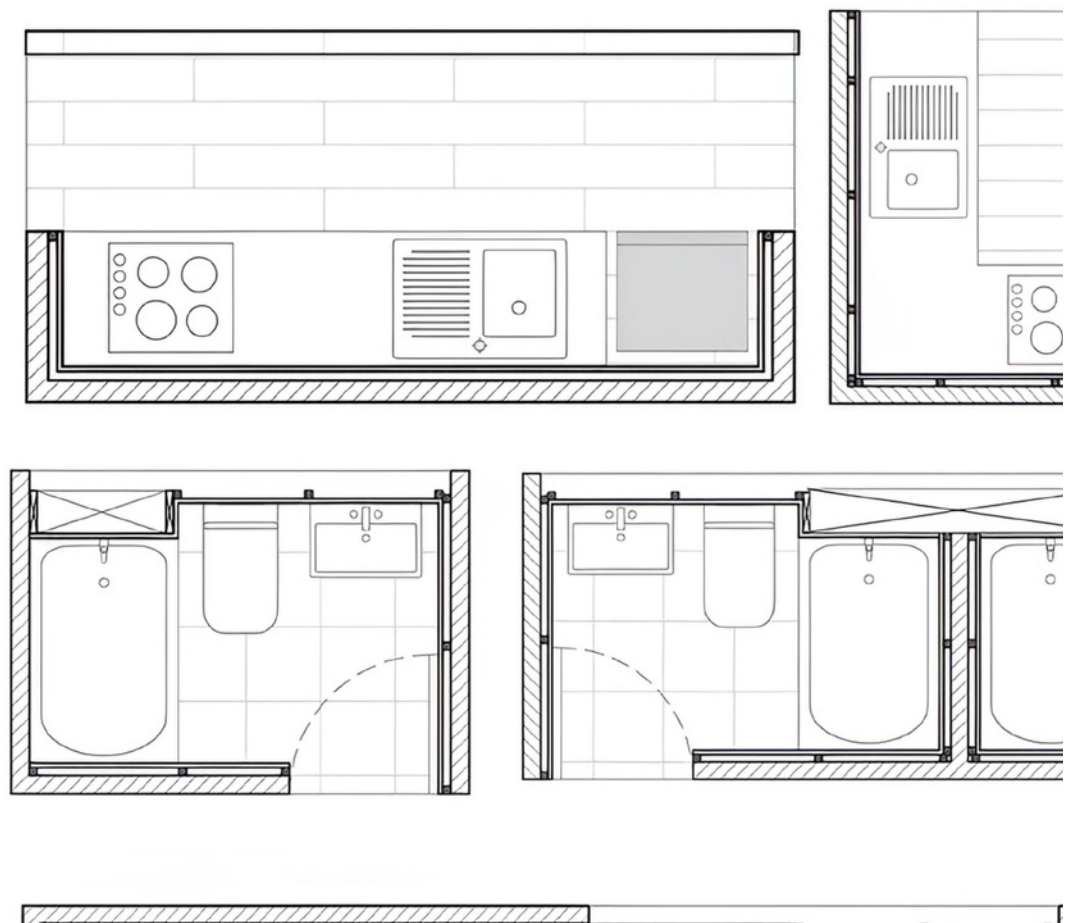


Figura 1. Módulos estandarizados de cocinas y baños que forman parte de la PPM. Fuente: Elaboración propia.

b) Módulos multi-espaciales adaptables: Estos planteados como un chasis base de planta rectangular con dimensiones fijas (estandarizados) o adaptables. Para estos módulos se proponen unas dimensiones máximas en función de sus posibilidades de transporte. Estas se definen en 3.6 de ancho, 8 m. de largo y 3.20 m de alto (Figura 2).

c) Componentes modulares de cerramiento: Estos se plantean como elementos que se acoplan como cerramientos al chasis para conformar los módulos multi-espaciales.

Los criterios de configuración modular se establecieron para facilitar y garantizar la integración eficiente de los distintos tipos de módulos, con la finalidad de que puedan adaptarse a las particularidades de diseño de cualquier planta arquitectónica. De esta manera se plantea la incorporación de los pods estandarizados (de baños y cocinas) dentro de los módulos multi-espaciales, con la finalidad de ser transportados y montados como un solo elemento.

Por otro lado, los módulos multi-espaciales son diseñados de manera que puedan unirse entre sí a partir del acoplamiento de sus caras en vertical y horizontal. El sistema solo está diseñado para edificaciones residenciales de baja y mediana altura, con “plantas tipo” repetidas en todos los niveles.

“En Chile no existe una definición precisa del número de pisos que caracteriza a una edificación de mediana altura. Sin embargo, basándose en criterios de diseño sismorresistente y seguridad contra incendios, se ha establecido un límite máximo de seis pisos para este tipo de edificaciones.”

4.3. Sistema estructural y constructivo

El sistema estructural y constructivo planteado se ajusta a las características de cada tipo de módulo. De acuerdo a esto, para los pods o módulos estandarizados, se propone un sistema de entramado ligero con sistemas de anclaje que garanticen su acoplamiento a los módulos multi-espaciales. Por otro lado, para los módulos multi-espaciales se propone la conformación de un chasis base, compuesto por pilares en forma de “L” y vigas de sección rectangular; ambos componentes fabricados en madera laminada encolada. Asimismo, tanto las losas de piso, como las losas superiores del módulo, se plantean en CLT (Figura 2).

Adicionalmente se propone para los cerramientos verticales, tabiques estandarizados de entramado ligero de 1.20 m de ancho por 2.30 m de alto, que se acoplan al chasis, adaptándose a cada diseño en forma específica.

Con respecto a las uniones entre componentes y módulos, se plantean conexiones intramodulares e intermodulares con distintos tipos de conexiones que faciliten tanto el ensamblaje como la transmisión adecuada de cargas. Estas, según los casos, implementan uniones mediante herrajes especiales y tornillos (Figura 3).

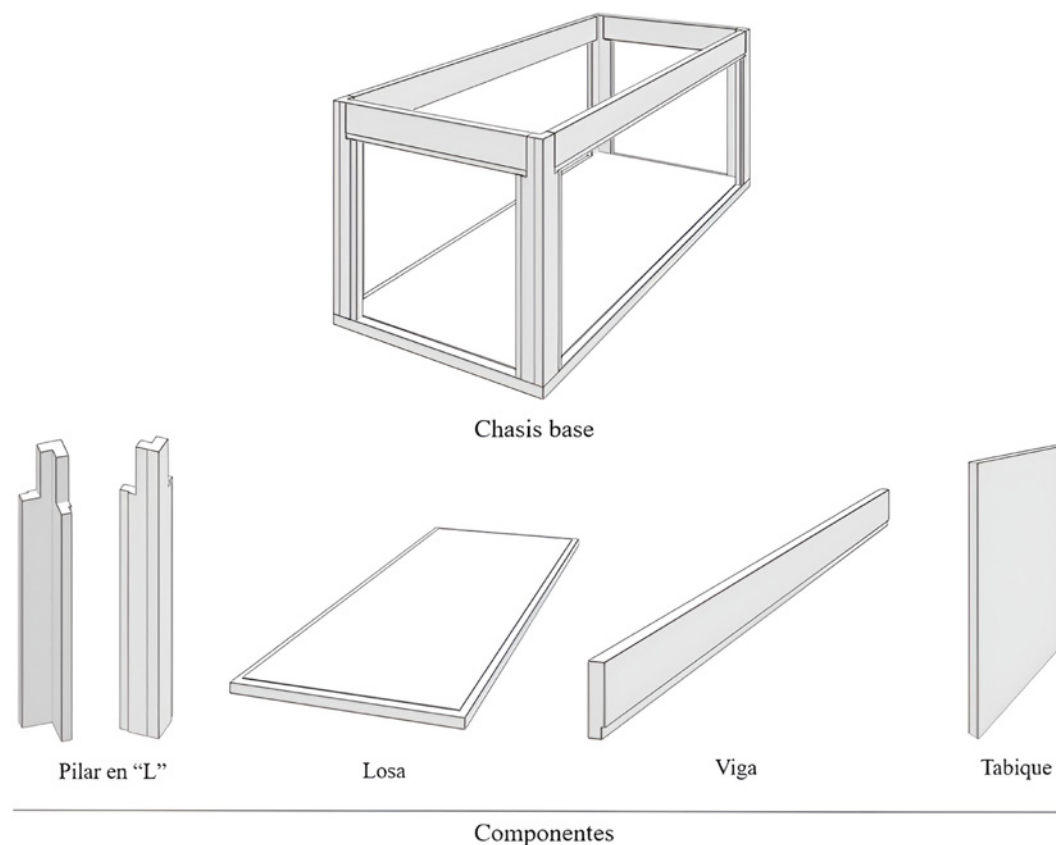


Figura 2. Sistema constructivo de los módulos multi-espaciales. Fuente: elaboración propia.

A nivel de diseño estructural el sistema propuesto toma en cuenta un predimensionamiento establecido de forma consistente con la normativa vigente y la experiencia. Por otra parte, el comportamiento estructural general se fundamenta en el trabajo conjunto y acoplado de los módulos al ensamblar el sistema completo, lo que favorece la respuesta global y la eficacia, debido a la colaboración e interacción de módulos conectados entre sí. Este efecto de acoplamiento tridimensional, es particularmente importante para la eficacia del sistema frente a cargas laterales.

Como criterios generales de predimensionamiento se toman los siguientes:

- a. Carga Axial en pilares: la demanda de tensiones normales en la sección transversal bruta de los pilares generada por cargas verticales de servicio (peso propio + cargas vivas de uso) debe ser menor que 30% de la tensión admisible básica de diseño.

Siguiendo este criterio, se permite dejar capacidad estructural remanente suficiente para que los pilares puedan acomodar otras solicitaciones como cargas laterales o efectos concentrados.

Por ejemplo, si se considera el módulo de máximas dimensiones propuesto (3.6 m. x 8 m.), si el peso propio se estima de forma amplificada en 200 kg/m², y la carga viva en 250 kg/m², la demanda de carga axial para una columna de un módulo se estima en 13 ton. para cada piso (asumiendo un área tributaria de un cuarto del área de planta del módulo).

Por su parte, de acuerdo a la normativa chilena (NCh 2161:1995), la tensión admisible básica para compresión paralela a la fibra en columnas laminadas es de 12 MPa.

Considerando lo anterior, el factor de ocupación (razón entre la demanda de tensión axial y la tensión admisible básica) se calcula como 5.3%/piso usando la columna en forma de L propuesta. Esto sugiere que para un módulo de dimensiones máximas se podrían alcanzar los 6 pisos de altura cumpliendo con el criterio de prediseño establecido.

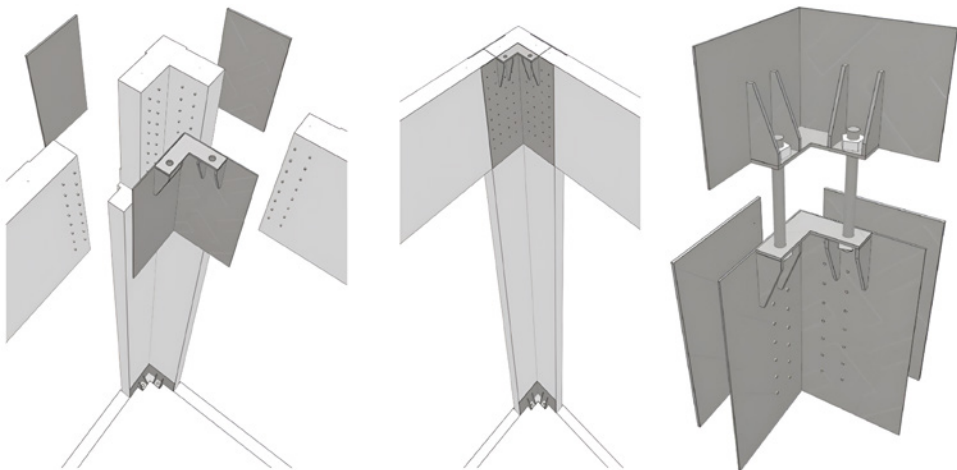


Figura 3. Sistema de conexión intramodular e intermodular. Fuente: Elaboración propia.

- b. Arriostramiento Lateral: desde el punto de vista del prediseño, el arriostramiento lateral se busca asegurar a través de proveer una estructuración y configuración en planta que favorezca disponer de adecuada rigidez, resistencia y redundancia de forma balanceada para las cargas laterales en los dos ejes principales del edificio. En este criterio, el disponer de un comportamiento acoplado tridimensional resulta esencial para proporcionar una plataforma mínima que permita definir los arriostramientos laterales (a través de muros de corte de entramado ligero o bien de CLT) que se requieran de acuerdo a las condiciones de diseño final.
- c. Vigas en flexión: la deflexión para cargas verticales instantáneas de servicio debe ser menor que $L/300$, donde L es la luz libre entre apoyos de la viga (norma Chilena NCh 1198:2024). Por ejemplo, para el caso del módulo de máximas dimensiones (8 m x 3.6 m de área de planta), la mayor luz libre de la viga es de 7.5 m, por lo que el límite de deflexión sería de $7.5/300 = 0.025$ m. Si se considera el módulo de elasticidad básico de 11000 MPa (según NCh 2161:1995 para vigas de Grado A) y la sección transversal recomendada de 100 mm x 550 mm para las vigas, la deflexión que se obtiene para peso propio + cargas vivas es de 2.1 cm, lo que cumple el criterio y deja cierto margen para situaciones que pueden aparecer en el diseño definitivo.

No obstante, la definición y cumplimiento de los criterios anteriores, para la posterior construcción y puesta en servicio de cada configuración estructural generada por un determinado arreglo de módulos, se debe diseñar y verificar en detalle siguiendo las normas y reglamentación técnica vigente, de acuerdo a su uso final, tipo de suelo, zona sísmica, zona climática, etc.

4.4. Criterios de estandarización

La estandarización se plantea tanto a nivel de productos como de procesos. De esta manera, la estandarización de productos se propone tanto en pilares y tabiques de cerramiento, como en algunos módulos, como los pods de baños y cocinas (Figura 1). Por otro lado, la estandarización de procesos se propone igualmente en algunos componentes y módulos con la finalidad de garantizar la flexibilidad del sistema, como es el caso de las vigas, en las cuales se plantea una estandarización geométrica a nivel de sección transversal, con variantes dadas solo por el largo del componente.

5. VALIDACIÓN PRELIMINAR DE LA SOLUCIÓN

Como última etapa de la investigación se plantea la validación de la eficacia de la plataforma de producto modular (PPM) propuesta. De esta manera la validación se hace tomando en cuenta tres aspectos: a) Adaptabilidad de la plataforma a diseños preexistentes; b) Optimización de los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje, tomando en cuenta el uso de herramientas BIM, diseño automatizado; y c) Optimización de los procesos constructivos a partir de la estandarización de productos y procesos.

En esta publicación se muestran las validaciones preliminares realizadas en cuanto a la adaptabilidad de la plataforma, y la eficiencia de su aplicación a partir de herramientas BIM y diseño automatizado.

5.1. Primer ciclo de iteraciones: Adaptabilidad de la Plataforma de Producto Modular (PPM)

Con la finalidad de comprobar la eficacia de la PPM en cuanto a su adaptabilidad a diseños preexistentes y a su aplicación a través de herramientas BIM, se realizaron una serie de iteraciones a partir de cinco casos de estudios seleccionados en función de sus diferencias en cuanto a configuración espacial y número de recintos. Para esto, la PPM se crea de manera digital modelando tanto los componentes constructivos de los módulos multi-espaciales, como los pods estandarizados de baños y cocinas a través del software Revit. A partir de esto se hicieron ensayos de modularización mediante configuración manual de los casos de estudio, usando los elementos BIM previamente modelados. Esto implicó una modularización preliminar en 2D, mediante el software AutoCAD para luego realizar el diseño por configuración mediante Revit (Figura 4).

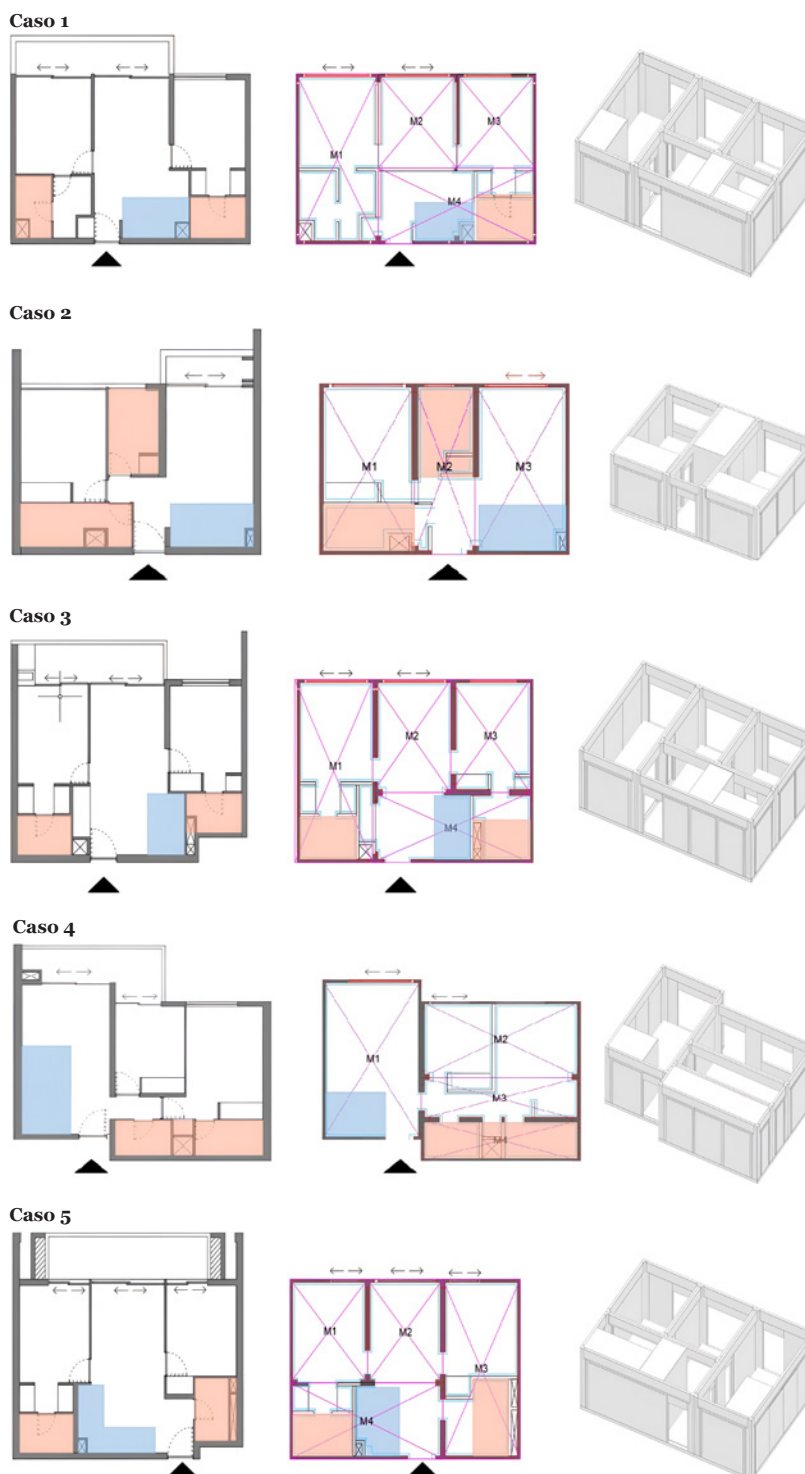


Figura 4. Primer ciclo de iteraciones: implementación de la PPM en la modularización de cinco casos de estudio.
Fuente: elaboración propia.

El proceso permitió comprobar la adaptabilidad de la PPM propuesta con resultados preliminares satisfactorios. Sin embargo, se constató que la plataforma requiere de algunos ajustes en su aplicación que permitan una adaptación más eficiente en casos complejos. La implementación de los pods estandarizados de baños y cocinas requirió, en algunos casos, un ajuste dimensional del espacio de inserción o, en otros casos, del aprovechamiento como espacios de almacenamiento, de los espacios residuales que se generan al insertar los módulos en espacios más grandes. Por otro lado, en los casos en donde la cocina se integra en forma abierta al living-comedor, la implementación de pods resultó compleja, lo que obligó a cambiar la disposición original de la cocina (casos 4 y 5). Asimismo, la adaptabilidad de los módulos multidimensionales encontró algunas limitaciones, como en los casos 3 y 5, en donde se dificultó la resolución de esquinas retraídas en planta, lo que requirió de un ajuste en el diseño definitivo.

5.2. Segundo ciclo de iteraciones: Automatización de la plataforma

Con la finalidad de explorar niveles más avanzados de optimización del proceso de diseño, se plantea la implementación de automatismos a través de los softwares Rhinoceros 7 y Grasshopper 1.0.0007, en dos casos de estudio (Figura 5).

Los procesos de automatización se aplicaron en dos modelos distintos de apartamentos que comparten un mismo módulo multi-espacial estandarizado, contentivo de baños (Figura 5).

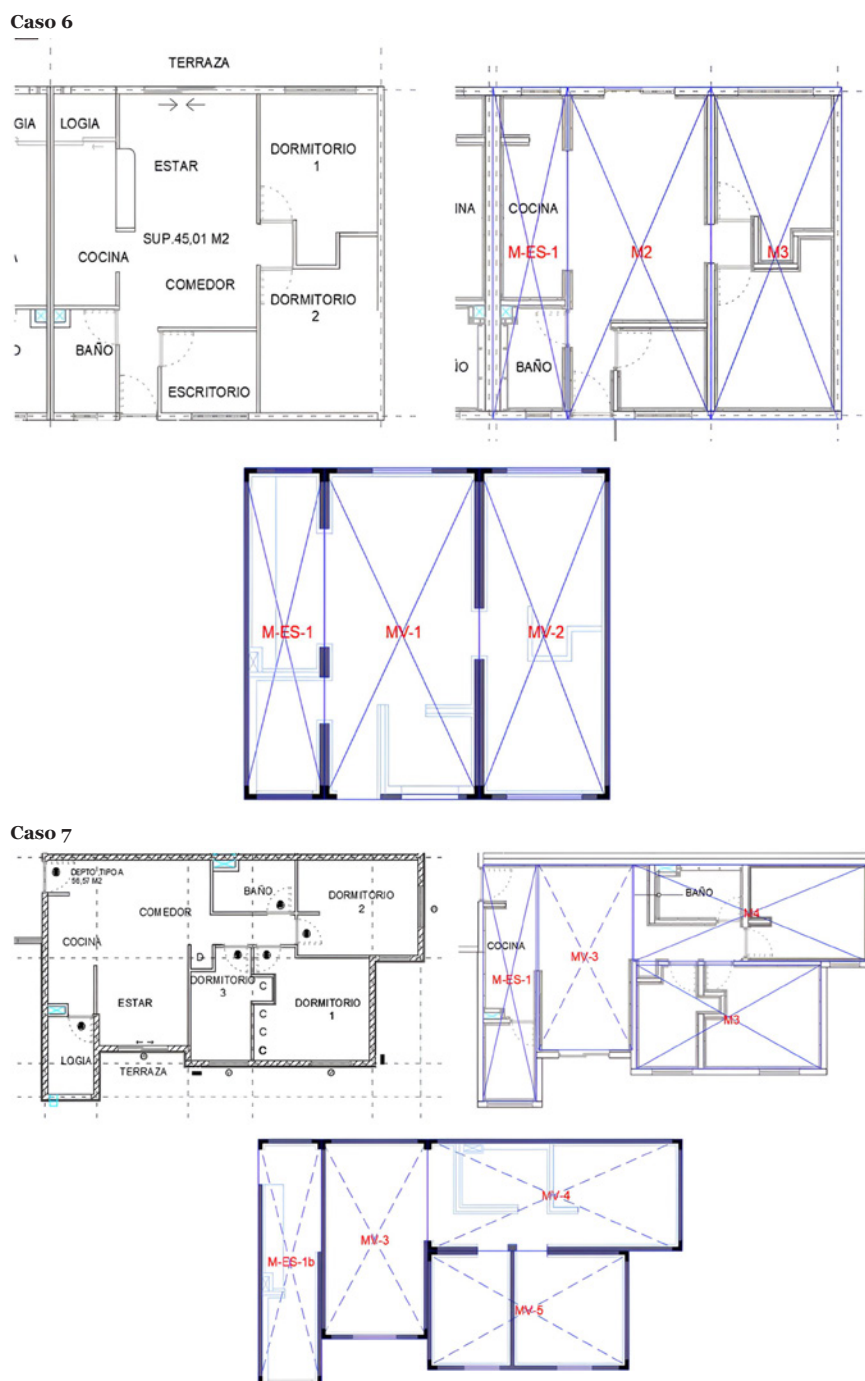


Figura 5. Segundo ciclo de iteraciones: proceso de modularización preliminar 2D en los casos de estudio.
Fuente: elaboración propia

Para esto, en primer lugar, se generó un algoritmo que permitió la parametrización de los módulos multi-espaciales completos. En este sentido, en el algoritmo, cada módulo se define mediante cuatro parámetros básicos: posición en el eje X, posición en el eje Y, ancho total y largo total. La geometría base de los elementos estructurales (vigas, columnas, cielo y piso) se predefinió según el diseño, lo que simplifica el algoritmo, al evitar la inclusión de parámetros adicionales específicos. Para definir esta geometría base, se utilizan operaciones y entidades geométricas fundamentales, tales como puntos, planos, curvas, cajas, extrusiones, traslaciones, entre otras. De acuerdo a esto la geometría base de los elementos estructurales se posiciona respecto del sistema de coordenadas global del conjunto que conforma la planta del respectivo caso de estudio. Finalmente, únicamente se visualizan en tres dimensiones los componentes correspondientes a las entidades geométricas de vigas, columnas, cielo y piso, con el fin de representar el conjunto de módulos. Se incluyen rótulos para identificar el nombre del módulo en el espacio tridimensional (Figuras 6 y 7).

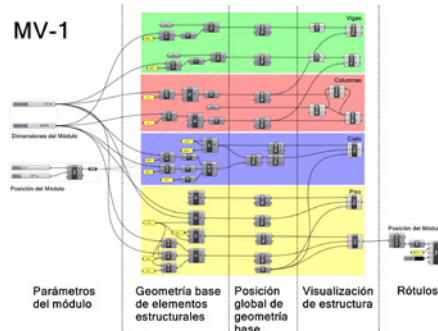


Figura 6. Algoritmo base para la parametrización los módulos multi-espaciales. Realizado en Grasshopper. Fuente: elaboración propia.

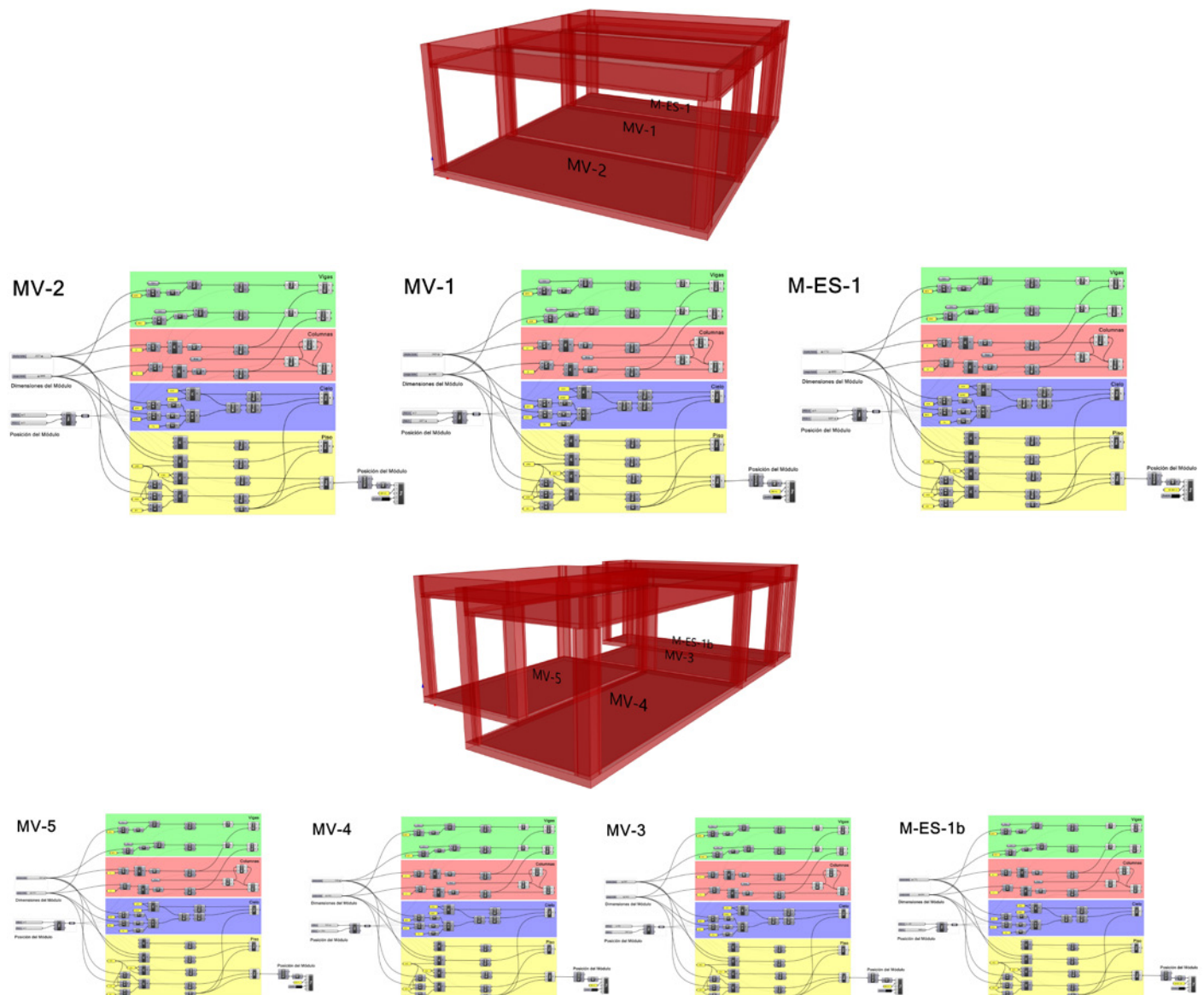


Figura 7. Modelado y parametrización de módulos multi-espaciales. Realizado en Grasshopper. Fuente elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

En este estudio se muestran los resultados preliminares de un proyecto de investigación en curso, que busca el desarrollo de una plataforma de producto modular (PPM) como herramienta que permita alcanzar altos niveles flexibilización del diseño y máxima industrialización en la construcción de edificaciones residenciales de baja y mediana altura en madera. La propuesta se centra en aumentar la eficiencia en el diseño para la manufactura y ensamblaje, así como en maximizar el volumen de construcción fuera de sitio, para alcanzar mayor control de calidad de los procesos constructivos, reducir desperdicios y mejorar los niveles de seguridad y salud laboral.

De manera preliminar se pudo constatar que la aplicación de la PPM permite optimizar la toma de decisiones a nivel de DfMA y los tiempos de modelamiento estructural.

La implementación de la plataforma a través de métodos tanto manuales como automatizados, permitió comparar y valorar los alcances de ambos métodos. Uno de los aspectos relevantes a evaluar en las primeras etapas, fue la adaptabilidad de la solución a distintos diseños de apartamentos. En este sentido, aun cuando se pudo constatar un buen nivel de adaptación a diseños preexistentes, la solución aun requiere de ajustes para alcanzar una mayor eficacia en su implementación en diseños complejos.

Por otro lado, aunque la solución propuesta aporta grandes ventajas en términos de industrialización, la modularización tridimensional implica una alta repetición de componentes (pilares, muros y losas), y un aumento del área y volumen de construcción, lo que requiere una evaluación exhaustiva de su viabilidad económica. Sin embargo, la implementación de un sistema híbrido (chasis-pods) permitió evitar la repetición de elementos de madera masiva en muros, al alternarlos con muros entramados.

El método de modularización propuesto representa un punto de partida prometedor para optimizar los procesos de diseño y construcción de edificaciones residenciales en altura en madera. Su implementación como plataforma de producto modular, en combinación con recursos de automatización avanzados e inteligencia artificial, se percibe con alto potencial para optimizar los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de estas edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al Grupo de Investigaciones en Arquitectura y Construcción Industrializada (ACI) de la Universidad del Bío-Bío.

Asimismo, agradecemos el financiamiento otorgado por Programa Fondo de Apoyo para la Participación en Eventos Internacionales de la Universidad del Bío-Bío, asignado con el código FAPEI: FP2400039.

Franco Benedetti también agradece a ANID BASAL FB210015 por la vigente colaboración científica con su departamento académico.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Trabajo realizado en el marco del proyecto de iniciación interno IN 2310325 denominado: “Desarrollo de plataforma de producto modular en base a BIM, aplicada al diseño de viviendas en altura en madera masiva en Chile”, financiado por la Universidad del Bío-Bío.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Mauricio Vargas-Mosqueda: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición. Desarrollo de plataforma de producto.

Francisco Quitral Zapata: Modelado digital y diseño de algoritmos de automatización en Grasshopper.

Javier Sepúlveda-Morales: Modelado digital y desarrollo de objetos BIM paramétricos en Revit.

Catalina Paredes: Análisis tipológico de edificaciones residenciales en altura en Chile.

Franco Benedetti: Diseño de sistema estructural.

REFERENCIAS

- [1] M. Smyth, *A Study of the Viability of Cross Laminated Timber for Residential Construction*. Stockholm, Sweden, 2018.
- [2] A. Davies, “Modern Methods of Construction: A forward-thinking solution to the housing crisis?,” RICS, Sept. 2018. [Online]. Available: <https://www.rics.org>
- [3] F. Zilic, J. Elissetche, and V. Hernández, “Oportunidades de manufactura avanzada para la industria de la construcción en Madera,” *Polo Madera*, Santiago, Chile, 2019, p. 98. [Online]. Available: <http://www.polomadera.cl>
- [4] Building and Construction Authority (BCA), *Singapore VDC Guide*. Singapore: Building and Construction Authority (BCA), Oct. 2017. [Online]. Available: <https://www1.bca.gov.sg>
- [5] X. Yin, H. Liu, Y. Chen, and M. Al-Hussein, “Building information modelling for off-site construction: Review and future directions,” *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 72–91, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.010.
- [6] S. Staub-french *et al.*, “Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction,” *BIM TOPiCS Research Lab – UBC, Vancouver*, Nov. 2018, p. 83. [Online]. Available: <https://bimtopics.civil.ubc.ca>
- [7] A. Shihani, A. B. Bhavsar, D. H. Hassan, M. Saidani, and A. Agha, “Investigating the benefits of BIM for mid-rise timber buildings in Canada: A qualitative study,” *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 24–33, Feb. 2021.
- [8] D. Popovic, S. Thajudeen, and A. Vestin, “Smart manufacturing support to product platforms in industrialized house building,” in *Proceedings of the Modular and Offsite Construction Conference*, Edmonton, AB, Canada, 2019, pp. 284–292.
- [9] T. W. Simpson, J. R. Maier, and F. Mistree, “Product platform design: Method and application,” *Research in Engineering Design – Theory, Applications, and Current Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 2–22, 2001, doi: 10.1007/s001630100002.
- [10] Bryden Wood, *Platforms: Bridging the Gap Between Construction + Manufacturing*, vol. 2. London: Bryden Wood, 2018.
- [11] S. Gao, R. Jin, and W. Lu, “Design for manufacture and assembly in construction: A review,” *Building Research and Information*, vol. 47, no. 8, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1080/09613218.2019.1660608.
- [12] Y. Tan, J. Zhao, Z. Chen, and C. W. Tam, “Construction-oriented design for manufacture and assembly (DfMA) guidelines,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 146, no. 8, p. 04020085, Aug. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001877.