

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EDIFICIO EN ALTURA UTILIZANDO MÓDULOS 3D DE MADERA CONTRALAMINADA



Estudiante: Rodríguez Lengaran, Paula

Director: Cuadrado Rojo, Jesús

RESUMEN

En este proyecto se propone un diseño preliminar de un edificio en altura completamente innovador.

Con la inspiración de los objetivos del proyecto europeo Eguralt de fomentar la construcción sostenible e investigar acerca de soluciones constructivas innovadoras utilizando materiales naturales, esta propuesta de edificio pretende aunar estas características con el objetivo de proponer una solución que ayude a impulsar la construcción sostenible.

Esta propuesta presenta una estructura mixta novedosa que integra una estructura de hormigón 'in-situ' con módulos de CLT ensamblados 'off-site'. En este proyecto además de analizar la viabilidad de esta estructura, también se realiza un análisis del proceso constructivo con el objetivo de plantear una construcción energéticamente sostenible.

PALABRAS CLAVE: CLT, construcción modular, edificación en altura.

LABURPENA

Proiektu honetan, altuerako eraikin guztiz berritzaile baten aurretiazko diseinua proposatzen du.

Europako Eguralt proiektuaren helburuak (eraikuntza jasangarria sustatzea eta material naturalak erabiliz eraikuntza-irtenbide berritzaileak ikertzea) oinarri hartuta, eraikin-proposamen honek ezaugarri horiek bateratu nahi ditu, eraikuntza jasangarria bultzatzen lagunduko duen irtenbide bat proposatzeko helburuarekin.

Proposamen honek egitura misto bat aurkezten du, "in situ" hormigoizko egitura eta "off-site" prestatutako CLT moduluak biltzen dituenena. Proiektu honetan, egitura horren abantailak eta eragozpenak aztertzeaz gain, eraikuntza-prozesuaren azterketa ere egiten da, energetikoki iraunkorra den eraikuntza bat planteatzeko helburuarekin.

ABSTRACT

This project proposes a preliminary design of a completely innovative high-rise building.

Inspired by the objectives of the European Eguralt project to promote sustainable construction and to investigate innovative building solutions using natural materials, this building proposal aims to combine these characteristics with the objective of proposing a solution that will help to promote sustainable construction.

This proposal presents a novel mixed structure that integrates a concrete structure "in-situ" with CLT modules assembled "off-site". In this project, in addition to analyzing the viability of this structure, an analysis of the construction process is also carried out with the aim of proposing an energetically sustainable construction.



INDICE

RESUMEN	3
LABURPENA	3
ABSTRACT	3
LISTADO DE ILUSTRACIONES	6
LISTADO DE TABLAS	7
INTRODUCCIÓN	9
CONTEXTO	11
EL SECTOR.....	11
EL MATERIAL	12
OBJETIVOS	14
BENEFICIOS.....	16
BENEFICIOS AMBIENTALES.....	16
BENEFICIOS SOCIALES	16
BENEFICIOS ECONÓMICOS.....	17
CASOS DE ESTUDIO	18
1. BROCK COMMONS	19
2. MJOSA TOWER	24
3. BIARRITZ PARME	28
4. APEX HOUSE	33
METODOLOGÍA.....	37
ANTECEDENTES DEL PROYECTO	37
METAS Y OBJETIVOS.....	38
DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	39
MODELADO	50
TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT.....	51
TAREAS	51
DIAGRAMA DE GANTT	53
PRESUPUESTO	54
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO I. MODELO REVIT	59
ANEXO II. RENDERIZADO	75

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Cuota de las emisiones globales de energía y procesos de los edificios en 2021 (izq) y cuota del consumo final de energía de los edificios en 2021 (drcha.)	11
Ilustración 2 - Principales asociaciones de la madera en España.	13
Ilustración 3 - Principales fabricantes de elementos estructurales de madera de España.	13
Ilustración 4 - Objetivos de Desarrollo Sostenibles.....	15
Ilustración 5 - Residencia Brock Commons	19
Ilustración 6 - Estructura y elementos estructurales.	20
Ilustración 7 - Unión metálica.	21
Ilustración 8 - Paneles de fachada.....	22
Ilustración 9 - Diagrama Gantt proyecto Brock Commons.	23
Ilustración 10 - Mjosa Tower.....	24
Ilustración 11 - Estructura torre Mjosa.	25
Ilustración 12 - Disposición elementos estructurales en una planta tipo.....	26
Ilustración 13 - Fases de construcción de Mjosa Tower.	27
Ilustración 14 - Viviendas Biarritz Parme	28
Ilustración 15 - Layout vivienda Biarritz	29
Ilustración 16 - Módulo balcones.....	30
Ilustración 17 - Módulo escaleras.	30
Ilustración 18 - Unión horizontal entre módulos	30
Ilustración 19 - Unión vertical entre módulos.....	31
Ilustración 20 – Proceso completo Biarritz Parme.....	31
Ilustración 21 - Planificación fabricación módulos en Biarritz Parme.....	32
Ilustración 22 – Planificación prefabricación y montaje Biarritz Parme.	32
Ilustración 23 - Apex house.....	33
Ilustración 24 - Núcleo de hormigón Apex House (izq.). Colocación de un elemento modular (drcha.)	34
Ilustración 25 - Planta tipo Apex House.	35
Ilustración 26 - Características de la construcción de Apex House.....	35
Ilustración 27 - Proyectos inspiración arquitectura.	39
Ilustración 28 - Esquema elección del volumen del edificio.	40
Ilustración 29 - Boceto volumen definitivo.	41
Ilustración 30 - División de los usos del edificio.....	42
Ilustración 31 - Layout aparcamiento.	43
Ilustración 32 - Layout zona comercial.....	43
Ilustración 33 - Layout zona común.	44
Ilustración 34 - Distribución zona residencial.	44
Ilustración 35 - Sistema estructural.	45
Ilustración 36 - Estructura de hormigón.	46
Ilustración 37 - Módulo prismático.	47
Ilustración 38 - Módulo curvo.	47
Ilustración 39 - Paneles fotovoltaicos.	49
Ilustración 40 - Jardines verticales.	49

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 - Casos de estudio.....	18
Tabla 2 - Ficha de datos principales de Brock Commons.....	19
Tabla 3 – Ficha de datos principales Mjosa Tower.	24
Tabla 4 - Ficha de datos principales Biarritz Parme.	28
Tabla 5- Ficha de datos principales Apex Tower.....	33
Tabla 6- Planificación de los tipos de viviendas.	45
Tabla 7 - Dimensiones y cantidad de módulos 3D.	47
Tabla 8 - Diagrama de Gantt.	53
Tabla 9 - Desglose presupuesto horas del personal.....	54
Tabla 10 - Desglose presupuesto amortizaciones.....	54
Tabla 11 - Resumen presupuesto.....	55

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la construcción moderna, la búsqueda de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente se ha convertido en una prioridad. Este trabajo se enfoca en un ambicioso proyecto de construcción, un edificio de 18 plantas con uso mixto, en el que se combina el uso comercial y residencial. Esta edificación innovadora presenta una estructura mixta que combina hormigón 'in-situ' con elementos modulares de madera contralaminada (CLT). A lo largo de este TFM, se explorará como el diseño de este edificio incorpora sistemas y tecnologías vanguardistas que permiten una reducción significativa del consumo energético a lo largo de su vida útil, alineándose con los objetivos de construcción sostenible propuestos por el proyecto europeo de Eguralt.

El proyecto Eguralt tiene como objetivo aplicar y difundir soluciones innovadoras para promover la construcción en madera de media altura en el ámbito SUDOE (Sudoeste de Europa), contribuyendo a la lucha global contra el cambio climático mediante el uso de materiales naturales de origen sostenible y renovable [1]. En este contexto, esta propuesta de edificio de madera contralaminada busca respaldar y defender estos objetivos, abogando por la construcción de viviendas en altura accesibles y el desarrollo de nuevos productos tecnológicos basados en la madera.

La estructura híbrida que presenta esta propuesta de edificio combina la resistencia y durabilidad de las estructuras tradicionales de hormigón con la sostenibilidad y calidez de la madera contralaminada. Se ha optado por la utilización de una estructura de hormigón en la cimentación, nivel subterráneo, primer piso de uso comercial y el núcleo de escaleras de toda la torre, lo que brinda una base sólida y resistente que garantiza la estabilidad y seguridad de la construcción.

Por otro lado, los elementos modulares de CLT se han empleado para todas las unidades residenciales, así como para las áreas comunes y accesos de las viviendas, lo que convierte a la madera en el material principal de la estructura. Además, la fusión de este material con el sistema constructivo de módulos prefabricados permite aprovechar la sostenibilidad inherente de la madera y los beneficios de la prefabricación y la industrialización. Esto tiene como resultado lograr una construcción más sostenible y alineada con los objetivos de construcción ecológica y a su vez permitir una mayor eficiencia en el proceso de construcción, reduciendo significativamente los tiempos de montaje en obra.

El enfoque de este trabajo se centra en la fase de diseño preliminar del edificio, tanto a nivel de la estructura como a nivel de los sistemas de acabado del proyecto. Por esta razón, el nivel de detalle con el que se va a presentar la estructura es lo que se conoce en metodología BIM como LoD300, es decir, se definen la posición de los elementos estructurales, el material y sus dimensiones aproximadas.

En cuanto a los sistemas de acabado, en este proyecto se han incorporado ideas y alternativas para lograr una construcción más sostenible. Se han adoptado sistemas innovadores, como la fachada ventilada, ventilación natural e instalación de paneles solares, para optimizar el consumo energético a largo plazo. Pero además de sistemas instalados en el propio edificio, en esta propuesta se comenta y analiza la importancia de decisiones de proyecto como puede ser la orientación del edificio, que permita un aprovechamiento máximo de la luz solar, o la ubicación urbana del mismo, que promueva y facilite el empleo del transporte público o el acceso a pie a los comercios de necesidades diarias de los inquilinos.

En resumen, este TFM se centrará en el desarrollo de un edificio de 18 plantas con uso mixto, que incorpora la innovadora combinación de elementos modulares de madera contralaminada y hormigón 'in-situ'. A lo largo de este trabajo, se analizará como la implementación de sistemas sostenibles y tecnologías avanzadas permiten un enfoque más ecológico y eficiente en el consumo energético, contribuyendo así al proyecto europeo de Eguralt y a la construcción moderna. También se explorará el potencial de esta nueva y prometedora unión entre la madera y la construcción modular, marcando un camino hacia un futuro más sostenible en el sector de la edificación.

CONTEXTO

EL SECTOR

El sector de la construcción y la edificación se encuentra a la cabeza de las industrias finales más contaminantes para el medio ambiente. Según el informe ‘Global Status Report of Buildings and Construction’, publicado anualmente por la Alianza Global para Edificios y Construcción (GlobalABC), en el 2022 el sector de los edificios y la construcción representó alrededor del 37% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía y los procesos y más del 34% de la demanda de energía a nivel mundial.

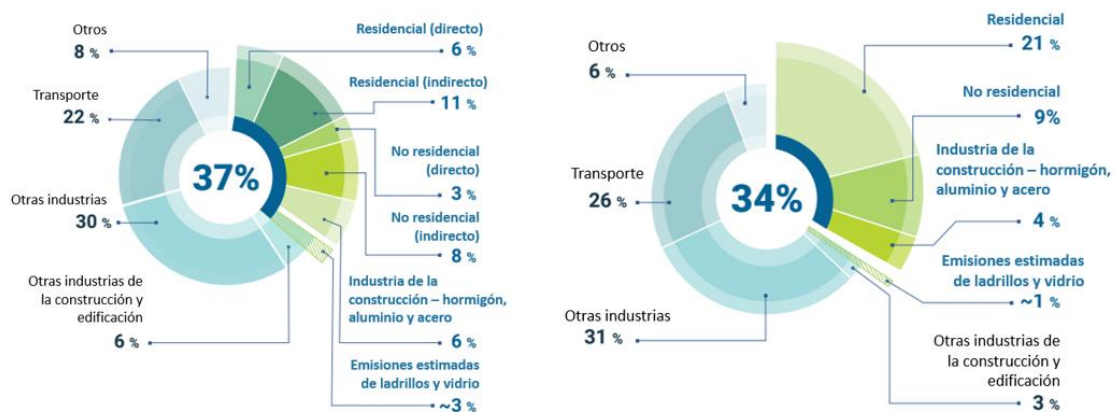


Ilustración 1 - Cuota de las emisiones globales de energía y procesos de los edificios en 2021 (izq) y cuota del consumo final de energía de los edificios en 2021 (drcha.).

Como se puede observar en la *Ilustración 1* anterior, se estima que los materiales utilizados en la construcción de edificios (como el hormigón, acero, aluminio, vidrio o ladrillos) representan alrededor del 9% de las emisiones totales de CO₂ relacionadas con la energía, lo que coloca al acero y el hormigón como los principales contribuyentes de gases de efecto invernadero. Además, el informe también arroja datos como la cantidad de residuos que se generan de forma global debido a la construcción, renovación y demolición de edificios, que durante este último año se aproxima a los 100 000 millones de toneladas, lo que indica que el sector de la construcción se coloca lejos de lograr la descarbonización propuesta en los acuerdos de París para 2050.

Desde GlobalABC ponen el foco en los materiales de construcción como camino hacia el cambio. Se expone la necesidad de transformar los materiales empleados en el sector y reducir el uso de aquellos con gran volumen e intensidad de emisiones de carbono, como el hormigón, el acero y los plásticos. Indican que para transformar estos materiales en otros más respetuosos con el medio ambiente existen dos vías, bien descarbonizando los materiales convencionales o mediante la utilización de materiales alternativos naturales [2].

Es en este punto donde la madera toma protagonismo como material de construcción, puesto que tal y como veremos a lo largo de los siguientes apartados, este material se ajusta a la perfección a los objetivos descritos anteriormente.

EL MATERIAL

La madera se considera uno de materiales más sostenibles para la construcción puesto que se trata del único material estructural que crece de forma natural en el planeta y es capaz proporcionar sumideros de carbono en las zonas rurales y almacenes de carbono en las ciudades. Es por esto, por lo que organizaciones a nivel europeo como la 'European Woodworking Industry Confederation' (CEIS-Bois), presentan a la madera como el único material que, manteniendo el modelo de negocio actual del sector de la edificación, puede llevarlo a alcanzar una descarbonización sustancial [3].

Tal y como se muestra en los gráficos del apartado anterior (*Ilustración 1*), el consumo de energía realizado en la construcción proviene de dos fuentes principales. Por un lado, el consumo que se realiza en los edificios mientras se habita en ellos, es decir, los gastos por calefacción o refrigeración que son los considerados como consumo de energía operacional o consumo directo. Por otro lado, el consumo asociado a la construcción del edificio, como el derivado de la fabricación de los materiales o su transporte, es el denominado como emisiones integradas o indirectas. Es interesante destacar que el uso de la madera en la construcción no solo podría contribuir a la reducción las emisiones indirectas debido a su cualidad de sumidero de carbono, sino que también podría ayudar a disminuir los consumos directos gracias a sus características aislantes, y es que este material presenta una naturaleza aislante sorprendente si se compara con otros materiales, siendo 10 veces más eficiente que el hormigón y 4000 veces más que el acero [3].

Sin embargo, a pesar de que la madera presenta *a priori* unas características idóneas para su uso en la edificación y que fue uno de los primeros materiales utilizados para la construcción que está presente en la mayoría de las estructuras tradicionales, la aparición de materiales modernos como el hormigón armado y el acero hizo que la madera quedará prácticamente en el olvido para la edificación moderna. Lo que ha desembocado en que hoy en día en España, únicamente el 2% de las viviendas estén fabricadas con este material [4].

No obstante, en las últimas décadas, gracias al desarrollo de nuevas soluciones constructiva innovadora y debido a la alarma por el cambio climático y la urgencia por construir de una forma más sostenible, la arquitectura ha comenzado a contemplar la madera como una alternativa viable hacia la construcción sostenible.

En respuesta a esta tendencia, tanto a nivel europeo como en España, se están llevando a cabo importantes esfuerzos por parte de las figuras gubernamentales para desarrollar e impulsar el uso de la madera en la edificación. Se han puesto en marcha diversos proyectos y programas a nivel estatal y europeo que buscan fomentar la adopción de prácticas más sostenibles en el sector de la construcción y se han creado asociaciones para poner en valor el sector forestal y las industrias asociadas al mismo en las distintas regiones o comarcas.

Algunas de las principales asociaciones a nivel estatal se muestran en la *Ilustración 2*:



Ilustración 2 - Principales asociaciones de la madera en España.

Además, la puesta en valor de la madera como material de construcción sostenible ha dado lugar a un aumento en la demanda y, a su vez, ha fomentado el crecimiento y desarrollo de la industria maderera. Empresas con raíces en la tradición carpintera han reconocido esta oportunidad y han decidido diversificarse hacia la producción de elementos de madera estructural. Gracias a este cambio estratégico, estas empresas han experimentado una transformación notable, escalando su producción y convirtiéndose en actores destacados en la industria.

A día de hoy, las empresas productoras de elementos estructurales de madera principales a nivel estatal se muestran en la siguiente *Ilustración 3*:



Ilustración 3 - Principales fabricantes de elementos estructurales de madera de España.

A lo largo de este proyecto, se hará referencia a diversas asociaciones, empresas fabricantes y proyectos que actualmente se encuentran en marcha con el objetivo de desarrollar el sector de la construcción en madera a nivel europeo y nacional, pero sobre todo a nivel del País Vasco.

OBJETIVOS

El propósito de este apartado es establecer el alcance y líneas de investigación que guiarán el desarrollo del estudio. Los objetivos se centran en aspectos **técnicos, económicos y ambientales**, con el fin de comprender a fondo los beneficios y desafíos asociados a esta innovadora combinación de materiales en el ámbito de la construcción. Los objetivos de este proyecto podrían clasificarse de la siguiente forma:

- **Evaluar la viabilidad técnica y económica de la estructura mixta:** Uno de los principales objetivos de este trabajo es analizar la viabilidad técnica y económica de la combinación de hormigón y madera contralaminada en la construcción del edificio. Se trata de una combinación de materiales no muy habitual, por lo que uno de los objetivos se centra en analizar si el comportamiento conjunto de estos dos materiales y soluciones constructivas es beneficioso y viable para la edificación.
- **Analizar el rendimiento energético y sostenibilidad del edificio:** Con la elección de una estructura mixta de hormigón y madera laminada se busca mejorar el rendimiento energético y disminuir el impacto medioambiental de la construcción. Por lo tanto, uno de los objetivos principales es estudiar y comparar el rendimiento energético y la sostenibilidad del edificio. Para ello, se analizarán los aspectos relacionados con el aislamiento térmico, la eficiencia en el consumo de energía y las emisiones de carbono, para lo que se analizará el ciclo de vida de los materiales empleados en la construcción.
- **Identificar ventajas y desafíos de la construcción modular con madera contralaminada:** Unos de los alcances de este proyecto es explorar las posibilidades y analizar las ventajas y desafíos de la construcción modular utilizando madera contralaminada en un edificio de esta escala. Como se ha comentado, esta solución constructiva es más habitual en estructuras de pequeñas dimensiones y empleando un material diferente, por lo que se analizarán cuáles son las posibilidades que ofrece esta solución a lo largo del proceso de construcción, la calidad del producto final, la reducción de plazos de entrega y la posibilidad de replicar este enfoque en futuros proyectos.
- **Proporcionar conclusiones para futuros proyectos:** Al finalizar el trabajo, se presentarán conclusiones basadas en los resultados obtenidos durante el estudio. Estas recomendaciones podrán servir como guía para futuros proyectos de edificación que busquen adoptar enfoques sostenibles y utilizar estructuras mixtas, promoviendo el uso de materiales renovables y tecnologías innovadoras en la industria de la construcción.

Estos objetivos que se plantean se enmarcan en una visión alineada y complementaria con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas [5]. En particular, se busca abordar los siguientes ODS (*Ilustración 4*):



Ilustración 4 - Objetivos de Desarrollo Sostenibles

- **9. “Industria, Innovación e Infraestructura”**: En relación con esta ODS este trabajo busca explorar e implementar soluciones innovadoras y sostenibles en la industria de la construcción, específicamente en la edificación en altura. La adopción de esta combinación de materiales y la incorporación de tecnologías avanzadas se alinean con la meta de promover una infraestructura resiliente, sostenible e inclusiva, que fomente el crecimiento económico y la generación de empleo, sin comprometer los recursos naturales y el medio ambiente [5].

- **11. “Ciudades y Comunidades Sostenibles”**: Este Objetivo de Desarrollo Sostenible también encuentra su reflejo en este trabajo, ya que se busca desarrollar una edificación que armonice con el entorno urbano y contribuya a la creación de comunidades más habitables y sostenibles. La incorporación de sistemas de eficiencia energética, la orientación del edificio para aprovechar al máximo la luz solar y la promoción del transporte público y el acceso a servicios locales, son aspectos que se alinean con el objetivo de construir ciudades más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles [6].

- **12. “Producción y Consumo Responsable”**: Este objetivo es un eje central en este trabajo, pues se analiza el impacto ambiental de la elección de materiales y tecnologías de construcción, buscando reducir el consumo de recursos y la generación de residuos, a la vez que se promueve la utilización de materiales sostenibles como la madera contralaminada. La adopción de una estructura mixta, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir la huella ambiental del edificio, es coherente con adoptar patrones de producción y consumo más responsables y respetuosos con el planeta [7].

- **13. “Acción por el Clima”**: Por último, esta ODS es esencial en este trabajo, ya que se plantea la implementación de soluciones que contribuyan a reducir las emisiones de carbono y mitigar el impacto del cambio climático. La elección de la madera contralaminada como material de construcción sostenible y renovable, junto con la búsqueda de sistemas energéticos más eficientes, reflejan el compromiso de esta investigación con la lucha contra el cambio climático y la preservación del entorno natural para las generaciones futuras [8].

BENEFICIOS

En este apartado, se destacan los numerosos beneficios que este proyecto pionero en el sector de la edificación puede ofrecer. Además, los impactos positivos de este proyecto van más allá del ámbito de la construcción, ya que sus beneficios se extienden a otros campos relevantes. Por consiguiente, en esta sección de la memoria del proyecto se presentan detalladamente los beneficios en las siguientes categorías:

BENEFICIOS AMBIENTALES

- **Reducción de emisiones de carbono:** La utilización de madera contralaminada y sistemas sostenibles en la construcción del edificio contribuirá a una reducción significativa de las emisiones de carbono asociadas al proceso de construcción, en comparación con los métodos tradicionales de construcción que utilizan materiales menos sostenibles. La utilización de elementos estructurales de madera de kilómetro cero, permite reducir la huella de carbono de la estructura prácticamente a cero.
- **Reducción de residuos generados en la construcción:** La implementación de elementos modulares prefabricados permite un enfoque más preciso y controlado durante la fase de obra del edificio. Esta metodología posibilita una mayor eficiencia en la utilización de los materiales, minimizando los excedentes y desperdicios típicamente asociados a la construcción tradicional.
- **Eficiencia energética:** La incorporación de sistemas de eficiencia energética en el diseño del edificio, como paneles solares o ventilación natural, permitirá una reducción del consumo energético a lo largo de la vida útil del edificio, disminuyendo así el impacto ambiental y promoviendo el uso responsable de los recursos naturales.
- **Uso de materiales de kilómetro cero:** La elección de emplear madera de bosques cercanos promueve la sostenibilidad ambiental al reducir la huella de carbono asociada al transporte de materiales, además de impulsar una economía circular local y fortalece la comunidad forestal y maderera regional. Al seleccionar madera de origen cercano, se fomenta la gestión responsable de los recursos forestales, garantizando la renovación y regeneración del bosque.

BENEFICIOS SOCIALES

- **Contribución a la vivienda asequible:** Con el fin de contribuir en la reducción de la problemática de la accesibilidad a la vivienda, este proyecto propone un enfoque inclusivo y socialmente integrador puesto que ofrece viviendas para diversos perfiles y todo tipo de modelos familiares. Gracias a la versatilidad que ofrece la combinación de los módulos prefabricados que se han diseñado, las viviendas se pueden adaptar a las necesidades de las distintas unidades familiares, con lo que se pretende acoger desde estudiantes o parejas en busca de su primer hogar, hasta familias con niños.

- **Mejora de la calidad de vida:** Esta propuesta de edificio también busca mejorar la calidad de vida de sus habitantes. La decisión de la ubicación de la construcción buscará promover el uso del transporte público y la movilidad sostenible, así como el fácil acceso a los comercios habituales incorporando un uso comercial en la planta baja de la construcción. Con esto, se busca facilitar la vida cotidiana de los habitantes e incorporar en ellos hábitos de vida más saludables, al igual que sostenibles.

- **Integración comunitaria:** La variedad de viviendas y la integración de espacios comunes fomentan la interacción y el sentido de comunidad entre los residentes. La existencia de áreas recreativas y sociales crea oportunidades para compartir experiencias, establecer relaciones vecinales y participar en actividades comunitarias, lo que enriquece la vida social de los habitantes y contribuye a un ambiente de apoyo y colaboración.

BENEFICIOS ECONÓMICOS

- **Reducción de costos operativos:** La incorporación de sistemas de eficiencia energética y la utilización de materiales sostenibles en el edificio contribuirán a una reducción significativa de los costos operativos a lo largo de su vida útil del edificio. Los residentes se benefician de facturas de servicios más bajas, como calefacción y refrigeración, lo que contribuye a un ahorro económico sustancial en sus gastos mensuales.

- **Impulso de la industria local:** Al optar por materiales sostenibles de kilómetro cero, el proyecto requiere de la industria local para llevarse a cabo. En primer lugar, la elección de utilizar madera proveniente de bosques cercanos fomenta el desarrollo del sector forestal local, lo que impulsa la actividad económica de los bosques regionales y genera empleo en las comunidades rurales. En segundo lugar, al proponer una solución de madera contralaminada prefabricada se busca promover el desarrollo del sector de la madera estructural de la región. La utilización de esta solución innovadora presenta un reto para los profesionales del sector, tanto para los ingenieros como para las empresas especializadas en la transformación de la madera. Esto conduce al crecimiento y consolidación de empresas locales dedicadas a la fabricación y procesamiento de madera.

- **Impulso del empleo y consumo local:** La incorporación de comercios en la planta baja del edificio conlleva un beneficio económico significativo al promover el consumo local y generar empleo en la comunidad. Al disponer de espacios comerciales en el mismo edificio, se crea un ambiente propicio para el desarrollo de pequeños negocios y emprendimientos locales. Los residentes del edificio y aquellos que viven en las cercanías encuentran mayor comodidad al tener acceso a servicios y productos de proximidad, lo que incentiva el consumo local y fortalece la economía de la zona.

CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se van a presentar algunos de los proyectos que se han estudiado y tomado como referencia para el desarrollo del proyecto que se expone en este trabajo. Los proyectos analizados en esta sección han sido seleccionados por distintas propiedades que les caracterizan como diseños innovadores y convierten en construcciones emblemáticas y únicas.





Entre los cuatro casos de estudio que se recogen en esta sección, los tres primeros edificios analizados han sido seleccionados por contar con una estructura principalmente realizada con elementos CLT. Aunque, como se mostrará a continuación, todos ellos presentan tipologías de estructuras con características muy diferentes.

Los dos primeros ejemplos destacan por ser dos de los primeros edificios en altura realizados con estructura de madera. Ambos, fueron en el momento de su construcción, los edificios más altos jamás construidos con este material.

Por otro lado, el tercer proyecto que se presenta es un ejemplo de construcción modular con estructura de madera. Este edificio residencial hace evidente la posibilidad de realizar viviendas con este sistema constructivo. Además, se trata de una obra realizada en el sur de Francia por una empresa local vasca.

Por último, se presenta el único de los edificios analizados que no cuenta con una estructura de madera. Sin embargo, se ha seleccionado este último proyecto como caso de estudio puesto que es un edificio en altura con una estructura modular, en este caso de módulos de estructura metálica. Por lo tanto, en este último caso el análisis se centrará con mayor detalle en la fase constructiva de este proyecto.

Tabla 1 - Casos de estudio.

1. BLOCK COMMONS	2. MJOSA TOWER	3. BIARRITZ PARME	4. APEX HOUSE
			

1. BROCK COMMONS

Block Commons es un edificio de 18 plantas que en el momento de su construcción fue el más alto jamás construido con estructura de madera. Esta estructura situada en el campus universitario de la Universidad de British Columbia en Vancouver (Canadá), alberga en su interior una residencia de estudiantes con capacidad para más de 700 alumnos [9].



Ilustración 5 - Residencia Brock Commons

DATOS GENERALES		AGENTES INVOLUCRADOS	
Localización:	Vancouver (Canadá)	Arquitecto:	Acton Estoy Architects
Año:	2017	Ing. Estructural:	Fase & Epp Eng.
Altura:	54 m (18 plantas)	Cliente:	Universidad de British Columbia
Uso:	Residencial		
DATOS TÉCNICOS			
Duración de la obra:		18 meses	
Sistema estructural:		MIXTO	
Núcleo:	Columnas:	Forjados:	
Hormigón	Madera Laminada	CLT	

Tabla 2 - Ficha de datos principales de Brock Commons.

INTRODUCCIÓN

La residencia de estudiantes Brock Commons, situada en el campus universitario de la Universidad de British Columbia en Vancouver (Canadá), fue inaugurado en mayo de 2017, lo que supuso que fuese el edificio de su categoría más alto del mundo construido con estructura de madera. Este prototipo permitió demostrar la viabilidad de la madera como material para la edificación de gran altura, gracias al continuo estudio y desarrollo de las aplicaciones de la madera en masa para la construcción e ingeniería que se desarrollan en los equipos de investigación de la universidad donde se ubica el propio edificio, la Universidad de British Columbia (UBC).

Tal y como se detalla en los siguientes apartados, el edificio está compuesto por una estructura híbrida de hormigón y madera, razón principal por la que se ha seleccionado como uno de los casos de estudio. Además, el edificio diseñado por el estudio Acton Ostry Architects Inc cuenta con la certificación LEED GOLD y todo su proceso de diseño y construcción se realizó llevando a cabo la tecnología BIM y la metodología VDC. Además, cabe destacar que el edificio consigue encapsular 2.563 toneladas de carbono, lo que puede equivaler a las emisiones realizadas por unos 450 vehículos durante un año [10].

SISTEMA ESTRUCTURAL

En rasgos generales, la estructura de Brock Commons es una estructura híbrida donde la cimentación, la planta baja, la primera planta y los núcleos de ascensores y de escaleras son de hormigón, mientras que el resto de las plantas residenciales están construidas con paneles prefabricados de CLT para los forjados, conectados mediante uniones metálicas a pilares de madera laminada de tipo GLT (Glued-Laminated Timber) o PSL (Parallel-strand lumber). Finalmente, la cubierta cuenta con una solución de estructura metálica, elegida para evitar la posibilidad de que el agua dañara la estructura de madera maciza.

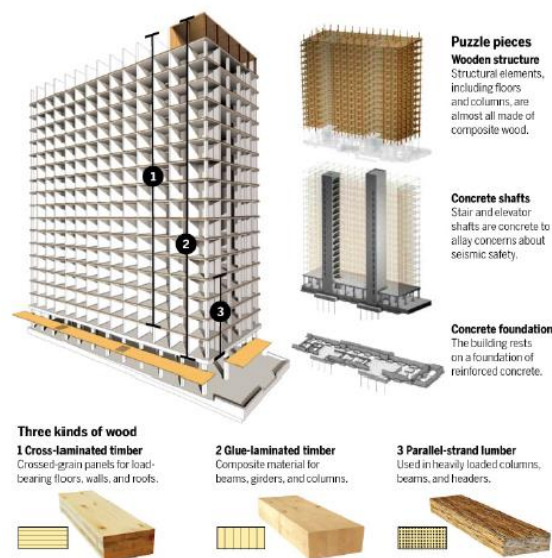


Ilustración 6 - Estructura y elementos estructurales.

En cuanto al sistema estructural del edificio, este se centra en las transmisiones de las cargas gravitatorias y las cargas laterales de forma aislada y mediante dos mecanismos diferentes.

Por un lado, las cargas gravitatorias se transmiten en todas las plantas superiores a través de los forjados CLT hasta las columnas de madera laminada, luego viajan hasta la estructura de hormigón de la primera planta y finalmente, se transmiten a la cimentación del edificio.

Por otro lado, el sistema frente a cargas laterales está compuesto por la estructura mixta. Los forjados de CLT actúan de diafragma y transmite las cargas horizontales hasta los núcleos de hormigón a través de conexiones de arrastre de acero localizadas en los bordes de los núcleos y en todo el perímetro del edificio y después de los núcleos a la cimentación. Esto es posible gracias a la peculiaridad de que los paneles CLT de los forjados se encuentran unidos a listones de madera contrachapada atornillados y unidos al panel, lo que permite que todos los paneles de una misma planta actúen como un único diafragma y puedan soportar las cargas laterales [10].

Forjados

En el caso de este proyecto se emplearon paneles de CLT de cuatro tamaños diferentes para evitar solapamientos. Todos ellos constaban de 5 capas y un espesor de 169 cm [11].

En la fabricación de los paneles se realizaron todos los mecanizados de huecos necesarios para las instalaciones y también para las uniones, lo que agilizaría el proceso de montaje. Además, los herrajes fueron colocados en fábrica, al igual que el sistema de elevación de los paneles que fue diseñado e integrado para que estos pudieran elevarse y colocarse de forma equilibrada.

Una vez colocados todos los paneles que formaban el forjado y colocados los pernos de unión con las columnas del nivel anterior, se atornillaron las ranuras de madera de contrachapado entre los paneles para conectarlos y que todos ellos funcionaran como un único diafragma. Finalmente, se incorporaron las correas de arrastre a los paneles y se atornillaron a los núcleos de hormigón de cada piso para asegurar la transferencia de las cargas laterales.

Pilares

La estructura incluye tres dimensiones diferentes entre los pilares que se emplearon en función de las características de las cargas y la ubicación de los elementos.

Se coloca una dimensión de pilares GLT entre las plantas 2-9 y se reducen las dimensiones de las columnas a partir de la décima planta. Además, se optó por colocar columnas de PSL en posiciones de alta tensión en el centro de los paneles del forjado entre las plantas 2-5.

Todos los elementos verticales cuentan con unas uniones metálicas innovadoras que permiten que los forjados CLT transmitan las cargas a los pilares y diseñadas para que se reduzca el tiempo de montaje durante el periodo de puesta en obra de la estructura, por lo que el sistema de unión venía incorporado en el pilar desde la fábrica [11].



Ilustración 7 - Unión metálica.

Elementos de hormigón

La estructura de hormigón con la que cuenta el edificio tiene distintas funciones para el funcionamiento del mismo.

Por un lado, tal y como se ha mencionado anteriormente, los núcleos de hormigón armado actúan como rigidizadores de la estructura frente a cargas laterales de viento y sismo.

Además, estos núcleos actúan como contrapeso para el cumplimiento de la normativa a vuelco del edificio. Debido al ligero peso de la estructura de madera que presentaría el edificio, el volumen de las cimentaciones requeridas se ve reducida en relación con la que presentaría un edificio de hormigón de las mismas dimensiones. Las pequeñas dimensiones de los cimientos del rascacielos se traducen en una menor inercia y por tanto una menor resistencia a vuelco, lo que se traduce en la necesidad de las estructuras de los núcleos de hormigón para cumplir los requerimientos.

Por otro lado, la losa de la primera planta es necesaria para establecer el nexo entre la estructura de hormigón y la de madera maciza de las plantas superiores. Así, se garantiza la transmisión de las cargas verticales de la estructura superior hasta el nivel inferior de hormigón.

En cuanto al proceso constructivo, los núcleos de hormigón se construyeron mediante un encofrado elevable de madera y acero formado por una caja de encofrado interior y otra de encofrado exterior que incluía una plataforma de seguridad para los trabajadores. Además, se diseñó el sistema de encofrado en doble altura para que se pudieran hormigonar varias plantas a la vez, lo que permitió reducir el tiempo de ejecución [11].

PREFABRICACIÓN

Además de todos los elementos prefabricados que ya se han mencionado anteriormente, como los paneles mecanizados para los forjados o los elementos de unión que se incorporan desde fábrica en los pilares, esta obra se caracteriza por contar con elementos de fachada modularizados.

Toda la fachada está formada por un cerramiento a base de paneles prefabricados que el fabricante desarrolló específicamente para la obra. Estos paneles incluyen los marcos de acero con ventanas perforadas, un sistema de protección contra la lluvia y un revestimiento laminado de fibra de madera. Además, los paneles cuentan con un sistema de conexión específico que garantiza la seguridad de los elementos de fachada, pero a su vez son sencillos de instalar.

Cada una de las plantas del edificio tiene 22 paneles: dos de esquina, que se reflejan entre sí, y doce tipos de paneles planos, de los cuales ocho se reflejan entre sí [11].



Ilustración 8 - Paneles de fachada.

FASE DE CONSTRUCCIÓN

La duración total de la obra de la residencia Brock Commons se alargó durante 18 meses. En la *Ilustración 9*, se muestra el Diagrama de Gantt que ilustra las diferentes fases del proceso constructivo y su duración:

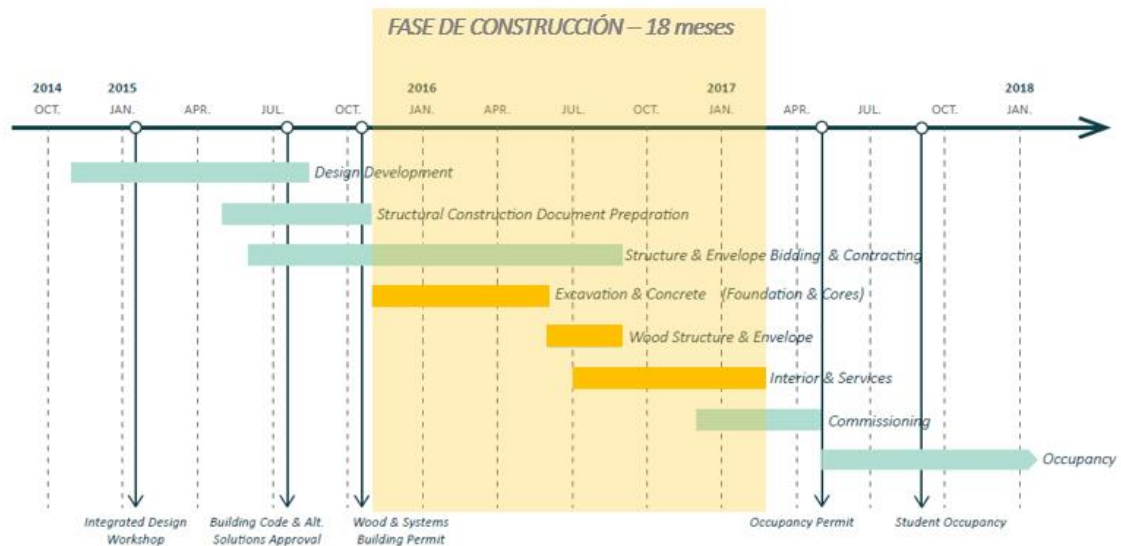


Ilustración 9 - Diagrama Gantt proyecto Brock Commons.

Los núcleos de hormigón y las plantas primera y segunda se completaron en 7 meses. Se construyeron en su totalidad y posteriormente se añadió la estructura de madera en masa.

Aunque la estructura de hormigón estaba finalizada en el momento en el que comenzó el montaje de la estructura de madera en masa, no se utilizó ningún ascensor de construcción durante el proceso, si no que se empleaba una plataforma de carga en voladizo para elevar los materiales hasta la planta en construcción.

El montaje de los elementos de madera y los paneles de cerramiento si se realizó de forma simultánea y se alargaron durante un total de 3 meses, lo que supuso un adelanto de 2 meses respecto a lo planificado en proyecto. Esto supone que aproximadamente se montaron dos plantas de estructura de madera por semana [11].

2. MJOSA TOWER

Mjøstårnet o Mjosa Tower es un edificio de madera de uso mixto de 18 plantas construido en Brumunddal, Noruega, situado frente a la orilla del lago Mjøsa. El edificio se terminó en marzo de 2019 y ha sido ratificado como el edificio totalmente construido con estructura de madera más alto del mundo. Mjosa Tower cuenta con oficinas, 72 habitaciones de hotel, 33 apartamentos con balcón, un restaurante en la planta baja, salas de conferencias y una terraza en la azotea. La pérgola arquitectónica prolonga el edificio 85,4 m desde el nivel del suelo [12].



Ilustración 10 - Mjosa Tower.

DATOS GENERALES			AGENTES INVOLUCRADOS		
Localización:	Brumunddal (Noruega)		Arquitecto:	VOLL ARKITEKTER	
Año:	2019		Ing. Estructural:	Moelven Limtre AS	
Altura:	85,4 m (18 plantas)		Cliente:	Arthur Buchardt from AB Invest AS	
Uso:	Mixto				
DATOS TÉCNICOS					
Duración de la obra:			12 meses		
Sistema estructural:			MADERA EN MASA		
Forjados plantas superiores:	Columnas y arriostramientos:		Forjados plantas inferiores:		
Hormigón	Madera Laminada		CLT		

Tabla 3 – Ficha de datos principales Mjosa Tower.

INTRODUCCIÓN

La iniciativa de construir la torre Mjostarnet nace de su principal inversor Arthur Buchardt y de la empresa AB Invest AS. El empresario quería demostrar al mundo que es posible construir con recursos, suministradores y competencias locales, por lo que consideró que este proyecto, desarrollado en su ciudad natal, sería la mejor manera de hacerlo. La ciudad de Brumunddal está situada a las orillas del lago Mjosa, que da nombre a la torre, y a unos 140 kilómetros de la capital noruega.

Los primeros bocetos del edificio datan de febrero de 2015 y tan solo 4 años más tarde el edificio más alto del mundo construido con estructura de madera ya estaba construido. El proyecto contó con la colaboración de la firma arquitectónica VOLL architects y con los productos de la empresa Moelven Limtre AS que se sitúa como los mayores fabricantes de elementos estructurales de madera de Noruega.

La torre cuenta con la mayoría de los componentes realizados en madera proveniente de bosques sostenibles de los alrededores de la ciudad y transformados en un aserradero a tan solo 15 kilómetros de la obra. Los principales elementos que comprenden la estructura son vigas y columnas de madera laminada, paneles de CLT y láminas de madera para la fachada. En total se emplearon unos 4.000 m³ de productos de madera y fue necesario talar unos 16.000 abetos [12].

SISTEMA ESTRUCTURAL

En cuanto al sistema estructural del edificio, el principal soporte de cargas consiste en grandes cerchas de madera laminada colocadas a lo largo de las fachadas que arriostran el edificio y transmiten las cargas laterales, así como los pilares y vigas de madera laminada del interior de la torre que transmiten hasta la cimentación las cargas gravitatorias.

En el diseño de edificios de madera, debido a la ligereza de la estructura, es muy importante tener en cuenta y verificar los criterios de confort que marcan las normativas, puesto que pueden ser los aspectos que gobiernen el diseño de la estructura. Es esto lo que sucede en el caso de la torre Mjosa, debido al bajo peso de la estructura de madera las acciones horizontales debidas al viento provocan grandes aceleraciones que inducen deformaciones en el edificio debido a su elevada altura, por lo que fue necesario incluir algunos de los forjados de hormigón en las plantas superiores [12].

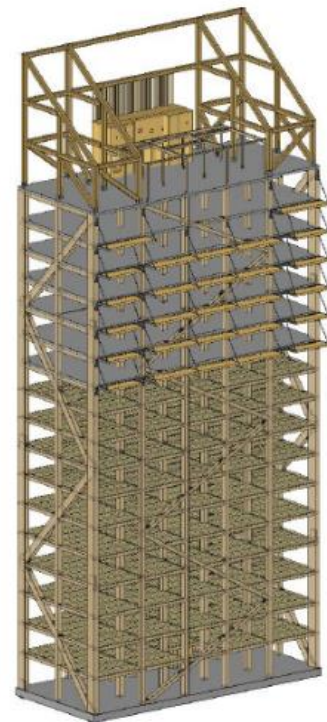


Ilustración 11 - Estructura torre Mjosa.

Vigas y Pilares

Tal y como se muestra en la *Ilustración 12*, la planta del edificio es de 16,3 m x 36,9 m y la distribución de las columnas en una planta tipo es la siguiente:

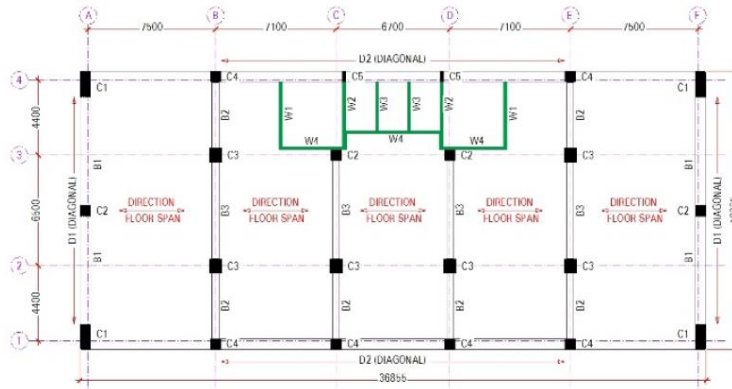


Ilustración 12 - Disposición elementos estructurales en una planta tipo.

Las 22 columnas que se representan con la letra C son las encargadas de transmitir las cargas verticales del edificio hasta su cimentación. Las columnas situadas en las cuatro esquinas del edificio son las que muestran la mayor sección (625 mm x 1485 mm) y además de las cargas verticales también reciben los esfuerzos de las cerchas que arriostran el edificio y reciben las cargas laterales.

Por su lado las vigas, sobre las que descansan los paneles de forjado presentan un vano máximo de 6,5 metros [12].

Forjados

Cada panel del forjado actúa como un diafragma casi rígido que distribuye los esfuerzos horizontales a los elementos de las celosías de las fachadas.

Desde la planta 2 hasta la 11 los forjados están contruidos con una solución prefabricada de cajones de madera laminada que permiten salvar 8 metros de luz.

Las últimas siete plantas cuentan con losas de hormigón de 300 mm de espesor sujetadas sobre vigas de madera laminada. Tal y como se ha comentado anteriormente, los elementos de hormigón añaden más peso a la estructura del edificio, lo que es beneficiosos ante el comportamiento dinámico [13].

Pérgola

Cabe destacar la presencia de una gran pérgola de madera en lo alto del edificio. Los elementos de madera laminada que compone esta estructura no macizos, sino que se realizó de elementos huecos para reducir las posibles grietas de contracción en las superficies exteriores. La sección de estos elementos está compuesta por 4 vigas rectangulares de 90 mm de ancho, encoladas en cada esquina. Además, todas las esquinas están redondeadas con un radio de unos 140 mm para mejorar la aerodinámica [13].

FASE DE CONSTRUCCIÓN

La fase de construcción de la Mjosa Tower se alargó durante 12 meses y como se puede ver en la *Ilustración 13* se dividió en 6 fases diferentes.

La construcción del cuerpo principal del edificio se dividió en las cuatro primeras fases, en cada una de las cuales se levantaban 5 plantas de la torre. A continuación, se realizó la instalación de los balcones y la última de las fases consistió en la construcción de la pérgola de lo alto del edificio.

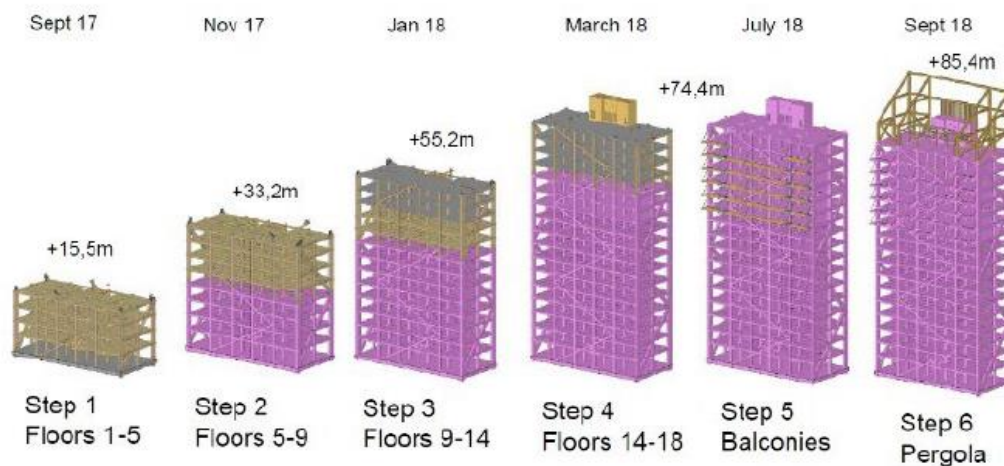


Ilustración 13 - Fases de construcción de Mjosa Tower.

En otras construcciones de este tipo la estructura de madera del edificio suele ser previamente montada en fábrica para comprobar que todas las piezas encajan a la perfección. Sin embargo, este no fue el caso de la torre Mjosa, gracias a la precisión de los diseños de todas las piezas mediante modelos virtuales, se tomó la decisión de ensamblar directamente en obra todas las piezas por primera vez.

La forma de ensamblado que se llevó a cabo en esta obra resulta bastante peculiar en comparación con otras obras similares. En el caso de la Mjosa Tower, por cada una de las fases de 5 pisos de la torre lo que se hizo fue ensamblar todas las vigas y columnas de los cinco pisos a la altura del suelo, para posteriormente elevarlos hasta la posición final con la ayuda de una grúa. Posteriormente, se montaban todos los paneles de forjados y los elementos prefabricados de la envolvente del edificio [13].

3. BIARRITZ PARME

Biarritz Parme es un edificio residencial construido en la localidad francesa de Biarritz. Es un proyecto de la promotora L'Office 64 de l'Habitat. La obra destaca por tratarse de un edificio construido exclusivamente con elementos modulares de madera contralaminada, utilizados para para las viviendas, los accesos por escalera y los balcones [14].



Ilustración 14 - Viviendas Biarritz Parme

DATOS GENERALES		AGENTES INVOLUCRADOS	
Localización:	Biarritz (Francia)	Arquitecto:	Architecture La
Año:	2015	Ing. Estructural:	Egoin
Altura:	3 plantas	Ciente:	L'Office 64 de l'Habitat
Uso:	Residencial		

DATOS TÉCNICOS	
Duración de la obra:	3 meses.
Sistema estructural:	Módulos CLT

Tabla 4 - Ficha de datos principales Biarritz Parme.

INTRODUCCIÓN

Biarriz Parme, un singular proyecto residencial modular ubicado en la localidad de Biarritz, Francia, consta de 21 viviendas y abarca una superficie total de 1.300 metros cuadrados, para lo que fue necesario utilizar 520 metros cúbicos de madera en su construcción.

Esta iniciativa fue impulsada por la empresa promotora L'Office 64 de l'Habitat y estuvo bajo la dirección de los arquitectos Phillipe Rabier y Lionel Gaetner.

Con el objetivo de minimizar tanto el impacto ambiental como las molestias para los residentes circundantes durante el proceso de construcción, el edificio de dos bloques fue construido utilizando módulos prefabricados de madera contralaminada (CLT). Cada bloque de viviendas comprende una planta baja y dos niveles superiores, compuestos por nueve unidades modulares. Además, se incluyó un módulo de acceso que alberga la escalera.

Cabe destacar que toda la madera utilizada para la construcción de este complejo es pino radiata proveniente de bosques de kilómetro 0, ya que la fabricación de los módulos y la puesta en obra de los mismos fue realizada por la empresa vasca Egoin [14].

SISTEMA ESTRUCTURAL

El proyecto se compone de 7 edificios idénticos. Cada uno de los edificios está formado por 9 módulos para las viviendas, 1 módulo para los balcones y 1 módulo para las escaleras.

La estructura está realizada exclusivamente con elementos de madera en masa prefabricados y ensamblados entre sí.

Elementos modulares viviendas

Cada una de las viviendas de Biarriz Parme estaban conformadas por 3 módulos, por lo tanto, se elaboraron tres diseños diferentes para los módulos prismáticos.

La geometría exterior de los módulos prismáticos era igual en todos ellos, siendo todos de 10 metros de largo y 3 metros de ancho. Esto permitía el transporte de los módulos en camiones estándar.

Uno de los módulos incorporaba 2 habitaciones, otro estaba destinado al aseo y una tercera habitación y por último el otro módulo incluía la sala de estar y la cocina de la unidad familiar.

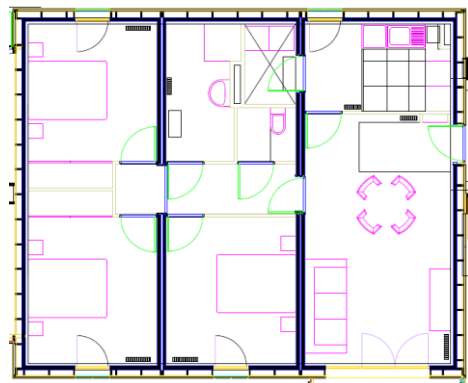


Ilustración 15 - Layout vivienda Biarriz

Elementos modulares balcones

El módulo que incorpora los balcones es único para todo el edificio, es decir, en el mismo módulo se incluyen los balcones de las 3 plantas.

Las dimensiones de este módulo son de 8,5 metros de largo, 3 metros de ancho y 4 metros de alto, por lo que su diseño también fue pensado para poder transportar desde la fábrica hasta la obra con un camión estándar.

Cabe destacar, que estos módulos incluyen parte de la estructura metálica, puesto que resultaba conveniente para hacerlos más esbeltos.

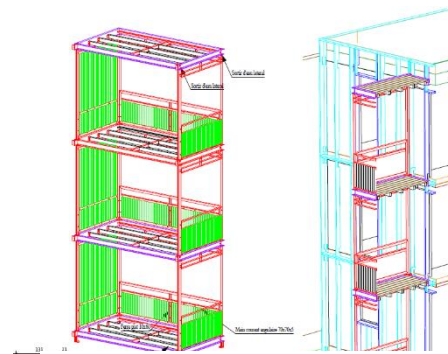


Ilustración 16 - Módulo balcones.

Elementos modulares escaleras

Por último, el módulo de escaleras es el de mayores dimensiones teniendo un largo de 8,5 metros, un ancho de 3 metros y una altura de 5 metros.

Este módulo incluye unas escaleras realizadas con estructura metálica. En la siguientes *Ilustración 17* se puede observar el elemento modular tal y como se traslada a obra (izquierda) y tras colocarle los elementos de madera que constituyen la fachada (derecha)



Ilustración 17 - Módulo escaleras.

Uniones

Los módulos que conforman las viviendas están colocados de forma que hay 3 módulos que forman la base y luego otros dos niveles con 3 módulos más colocados inmediatamente sobre los primeros.

Para realizar la unión de los módulos una vez colocados en esta disposición, se utilizaron dos sistemas, siempre uniendo los módulos uno a uno.

Por un lado, se realizaron las uniones horizontales entre los módulos del mismo nivel. Para esta unión se utilizaron bulones de 20x240 mm, para lo cual fue necesario realizar un mecanizado en fábrica en la ubicación donde se unirían los elementos. El detalle constructivo de la *Ilustración 18* muestra la unión descrita anteriormente.

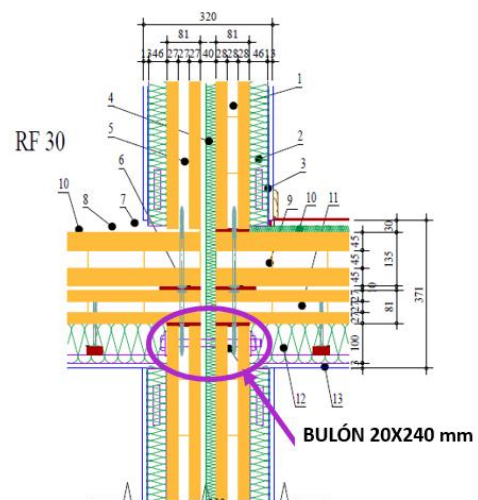


Ilustración 18 - Unión horizontal entre módulos

Por otro lado, se realizaron las uniones verticales, es decir, las uniones entre los módulos de niveles consecutivos. En este caso se utilizaron herrajes de placas planas atornillados con tornillos de 8x80 mm a ambos módulos. En la *Ilustración 19* se muestra un ejemplo de esta unión.

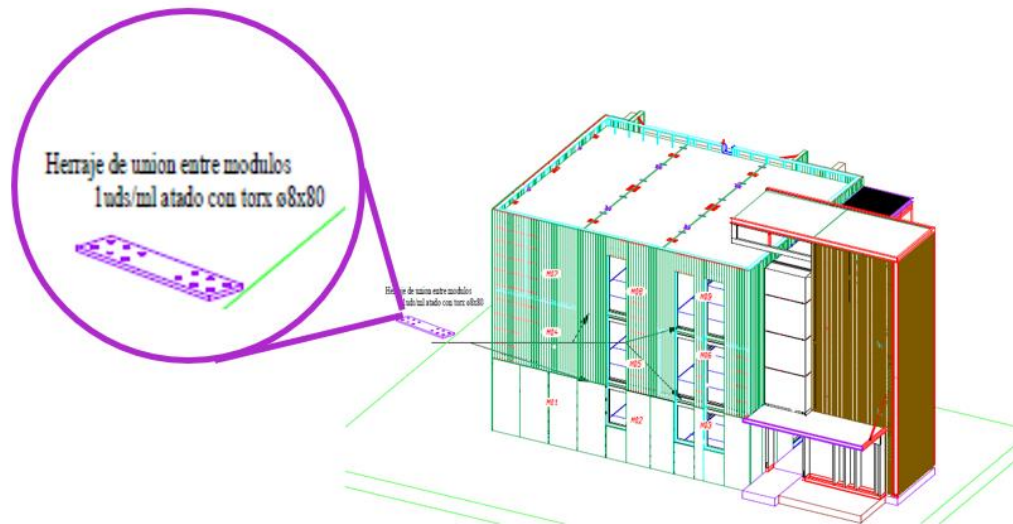


Ilustración 19 - Unión vertical entre módulos.

PREFABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

Los módulos que componen el edificio fueron completamente ensamblados en la fábrica que la empresa Egoin tiene en Natxitua (Bizkaia). Desde la empresa vasca las unidades salían completamente equipadas con las instalaciones de fontanería, electricidad, tabiquería, etc. A falta los últimos acabados y conexiones que se realizarían en obra. Posteriormente los módulos fueron trasladados a la obra en Biarritz mediante camiones. En el destino se colocaron los módulos en sus respectivas posiciones y se realizaron las uniones entre ellos y a la cimentación. Finalmente, se colocaron los elementos de acabados y fachadas. En la siguiente *Ilustración 20* se muestra el proceso completo mediante imágenes:



Ilustración 20 – Proceso completo Biarritz Parme.

Cada uno de los módulos tardó un total de 5 semanas en realizar todo el proceso, desde la fabricación hasta su finalización en obra. En la *Ilustración 21* se muestran un ejemplo todas las tareas que se realizaban por cada uno de los tipos de módulos y su planificación en semanas:

		ENERO					FEBRERO					MARZO					ABRIL					MAYO					JUNIO				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
MÓDULO 1A	PREFABRICACIÓN																														
	FABRICACIÓN DE LOS PANELES CLT																														
	ENSAMBLAJE DEL MÓDULO																														
	ELECTRICIDAD																														
	CALEFACCIÓN/VMC/FONTANERÍA																														
	CARPINTERÍA																														
	TABICUERÍA																														
	COLOCACIÓN DE LOS MÓDULOS																														
	IMPERMEABILIZACIÓN/REVESTIMIENTOS/ZINCADO																														
	ACABADO ELECTRICIDAD																														
ACABADO FONTANERÍA																															
ACABADOS CARPINTERÍA																															
ACABADOS TABICUERÍA																															
COLOCADO DEL REVESTIMIENTO																															
PINTURA																															
LIMPIEZA																															

Ilustración 21 - Planificación fabricación módulos en Biarritz Parme.

Por tanto, teniendo en cuenta que se utilizaron 5 tipos de módulos y que el comienzo de la fabricación entre los distintos tipos se escalonó en 1 semana para no saturar las instalaciones de la fábrica, la planificación global del proceso de fabricación y puesta en obra se refleja en la siguiente *Ilustración 22*:

	ABRIL					MAYO				JUNIO			
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
MODULO 1A													
MODULO 1B													
MODULO 1C													
MODULO 2A													
MODULO 2B													

Ilustración 22 – Planificación prefabricación y montaje Biarritz Parme.

Teniendo en cuenta que el movimiento de tierras y la obra de la cimentación comenzó 3 semanas antes de que comenzasen a prefabricarse las primeras tandas de módulos, la duración total de la obra se demoró únicamente en 12 semanas.

4. APEX HOUSE

Apex House, también conocido como Scape Wembley, es una de las residencias de estudiantes de la universidad de West London. El edificio situado en el barrio londinense de Wembley fue finalizado en septiembre de 2017 y construido en un tiempo récord de 12 meses. La residencia ofrece 580 habitaciones de distintas variedades y tamaños, repartidas en los 29 pisos con los que cuenta la torre [15].



Ilustración 23 - Apex house.

DATOS GENERALES		AGENTES INVOLUCRADOS	
Localización:	Londres (Reino Unido)	Arquitecto:	HTA
Año:	2017	Fabricante:	Vision Volumetric
Altura:	82m (29 plantas)	Cliente:	Tide
Uso:	Residencial		
DATOS TÉCNICOS			
Duración de la obra:		12 meses	
Sistema estructural:		MIXTO	
Núcleo:	Hormigón	Módulos:	Estructura metálica

Tabla 5- Ficha de datos principales Apex Tower.

INTRODUCCIÓN

Apex House se terminó en septiembre de 2017 y se convirtió en el edificio construido con elementos modulares autoportantes más alto de Europa del momento. La residencia cuenta con una torre de 29 plantas y dos alas de 8 plantas a cada lado que dan una forma de L al edificio. En total, la construcción incluye un total de 679 módulos prefabricados por la empresa Vision Modular Structures, de los cuales 437 se sitúan en la torre y los 242 restantes en los edificios laterales. Los módulos están hechos de una estructura de acero y se llevaban a obra completamente equipados, es decir, incluyen la cocina, el baño y todos los acabados interiores.

Este proyecto fue uno de los primeros edificios volumétricos en obtener la calificación BREEM Excelente, con características sostenibles como un sistema combinado de calor y electricidad en el sótano y paneles fotovoltaicos en el tejado. Además, cabe destacar que este proyecto ganó diversos premios de prestigio por su innovación en la estructura modular en altura, entre ellos el de Proyecto Offsite del Año de la revista Building [16].

SISTEMA ESTRUCTURAL

El sistema estructural de Apex House está basado en los que se conoce como método del núcleo en construcción modular. El edificio cuenta con un núcleo central hecho de hormigón armado, donde se sitúan las escaleras y el hueco de los ascensores. Este núcleo es rodeado por los elementos modulares que se acoplan a él, en este caso mediante una unión que fue diseñada expresamente para este fin. La función principal del núcleo de hormigón es absorber las cargas laterales de la torre y limitar los desplazamientos horizontales de la estructura.

Por otro lado, para la transferencia de cargas verticales cada uno de los módulos incorpora perfiles de acero de mayor tamaño en sus esquinas. Los módulos colocados en la segunda planta se conectaron a la losa de hormigón de la planta anterior y posteriormente el resto de los elementos modulares se fueron colocados y uniéndose entre sí mediante soldadura *in-situ* [17].

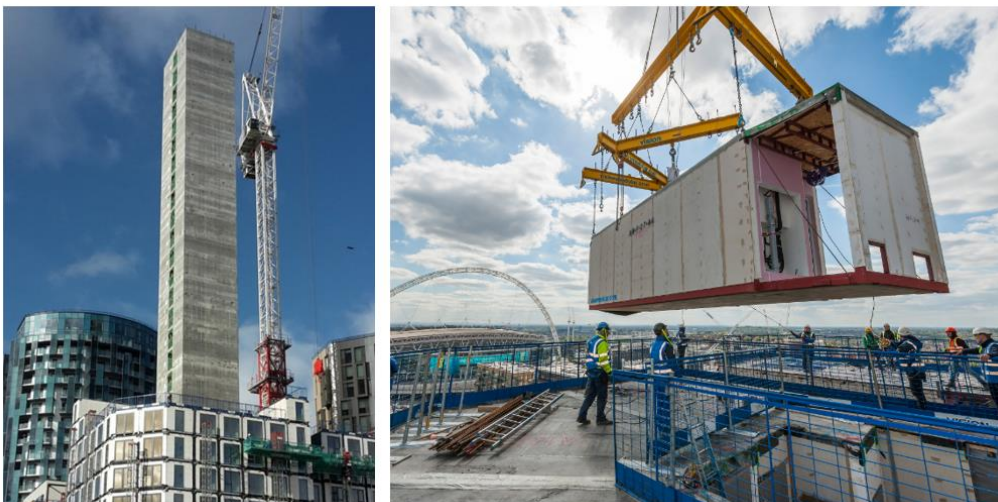


Ilustración 24 - Núcleo de hormigón Apex House (izq.). Colocación de un elemento modular (dcha.).

Elementos modulares

En esta obra se diseñaron 8 configuraciones diferentes de módulos y se realizó el edificio completo mediante la combinación de los mismos.

Las distintas configuraciones de módulos tienen distintos tamaños, aunque siempre acogiéndose a unas limitaciones debidas a su transporte, siendo el ancho máximo de 4,5 metros y el largo máximo de 12 metros. Lo mismo sucede con el peso de los contenedores que en este caso oscila entre las 12 y 17 toneladas en función de su tamaño y disposición.

La configuración de un módulo típico es una habitación de estudiantes, en la que se incluye un dormitorio, un baño y un área de estudio. Además, la mitad de los módulos incorporan una parte del pasillo para poder conectarse unos a otros por el interior.

Por otro lado, se diseñaron otros módulos de mayor tamaño que se sitúan en las esquinas de la torre y de las alas, tal y como se muestra en la *Ilustración 25* en color verde. Estos albergan las áreas comunes para los inquilinos de la residencia [18].



Ilustración 25 - Planta tipo Apex House.

PREFABRICACIÓN Y FASE DE CONSTRUCCIÓN

Este proyecto se caracteriza por su alto grado de prefabricación mediante los elementos volumétricos que componen el edificio. Tal y como se observa en la gráfica de la Ilustración 26, alrededor del 82% de la obra fue realizada mediante construcción volumétrica:



Ilustración 26 - Características de la construcción de Apex House.

Como se muestra en el gráfico de la derecha, la fase de la construcción volumétrica requiere muy poco tiempo de puesta en obra en comparación con la construcción tradicional. Fueron necesarios únicamente 4 meses para colocar todos los contenedores; sin embargo, todos esos módulos habían tenido que ser fabricados, lo que requiere una gran labor de anticipación y coordinación en el proyecto.

Los 679 módulos que se instalaron en la obra de Apex House se fabricaron en la planta de Vision Modular Systems en Bedford, mediante un proceso similar al utilizado en una línea de producción de automóviles. Fueron necesarios un total de 150 trabajadores de calificados y la planta lograba producir un total de 11 módulos diarios. De haberse podido aumentar el número de módulos fabricados diariamente la obra podría haberse finalizado aún más rápido.

Durante la puesta en obra de los módulos únicamente fueron necesarios 22 empleados en obra. Esto reduce la necesidad de instalaciones de servicios y áreas de bienestar para el personal en obra. Además, al eliminar la necesidad de andamios típicos de la construcción tradicional, se favorecen las condiciones de seguridad y salud de los trabajadores.

Lograr trasladar la mayor parte del trabajo a la fábrica de producción de los módulos consiguió reducir los desperdicios generados a tan solo un 2%. Este hecho fue clave, junto a otros factores, para la obtención de la calificación BREEAM Excelente que se le otorgó al edificio [18].

METODOLOGÍA

A lo largo de esta sección se describe completamente el proceso de elaboración de la propuesta de edificio objeto principal de este documento. Este apartado recoge todas las fases de creación, desde el planteamiento del problema hasta la elaboración de los documentos finales utilizados en la presentación de la propuesta, por lo que esta sección se divide en distintos subapartados.

En primer lugar, se comienza explorando los antecedentes del proyecto, donde se rastrean las raíces e inspiraciones que condujeron a la idea de crear el edificio objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Máster.

Posteriormente, se expondrán las metas y objetivos claramente definidos, delineando la visión y el propósito detrás de este ambicioso proyecto.

A continuación, la sección también se sumergirá en el corazón del proyecto, el desarrollo de la propuesta. En este apartado se muestran las decisiones tomadas en cuanto a diseño, sistema estructural y tecnologías innovadoras sostenibles que se van a incorporar al edificio. Se explicarán las elecciones críticas que se han realizado con el objetivo de crear una visión cohesiva y factible.

Además, se detallará cómo se ha confeccionado un modelo 3D preliminar para visualizar y comunicar de manera efectiva la idea que subyace en este proyecto. Este modelo no solo sirve como una representación tangible de la visión, sino que también desempeña un papel crucial en la evaluación y ajuste continuo de la propuesta.

ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El origen de este proyecto surge del conjunto de cadencias y necesidades tanto de las actuales dinámicas urbanas como de las demandas latentes en el sector de la construcción.

En el ámbito de los modelos urbanos, se perciben dos problemáticas centrales que sirven como catalizadores para esta iniciativa. En primer lugar, se destaca la actual inaccesibilidad a la vivienda de distintos colectivos en la sociedad. Este hecho está impulsando la necesidad de diseñar y desarrollar soluciones habitacionales accesibles y flexibles para una población diversa y en constante cambio en sus necesidades.

Por otro lado, se presenta la creciente tendencia de diseñar y planificar las ciudades de forma que el desplazamiento en automóvil sea inevitable para cubrir las necesidades diarias. Por lo que este proyecto ofrece una oportunidad para crear un sistema en el que se promueva un modelo urbano centrado en la movilidad sostenible y el comercio local.

En cuanto al sector de la construcción, como se ha comentado en apartados anteriores, se trata de una industria estancada desde hace décadas que necesita de urgente innovación, principalmente para disminuir la problemática con las excesivas emisiones que actualmente genera.

Gracias a las emergentes iniciativas desde las entidades gubernamentales, el proceso de renovación del sector está comenzando a despegar. Esta creación y promoción de proyectos europeos y estatales que se enfocan en promover una construcción más sostenible también ha resultado un incentivo para la creación de este proyecto.

En concreto, esta propuesta pretende acogerse a la iniciativa Eguralt, que plantea la incorporación de soluciones innovadoras en la construcción en madera en edificios de mediana altura en Europa.

METAS Y OBJETIVOS

En concordancia con las necesidades que motivan la creación de este proyecto, en este apartado se presentan y detallan los principales objetivos que se pretenden alcanzar tras desarrollar la propuesta:

- Creación de viviendas flexibles: Las unidades familiares experimentan un cambio en las últimas generaciones. Por un lado, las familias no son tan numerosas, por lo que la demanda de apartamentos de muchas habitaciones ha disminuido. Por otro lado, la frecuencia con la que las personas se trasladan de ciudad bien por trabajo o por estudios de forma temporal o semipermanente ha aumentado exponencialmente. Estos hechos llevan a plantearse que la oferta de algunos tipos de vivienda dentro de las ciudades es escasa, como por ejemplo la cantidad de apartamentos de tipo estudio.

Por lo tanto, este proyecto pretende desarrollar un edificio que dé cabida a todos estos modelos de vivienda que actualmente no se encuentran tan disponibles en edificios existentes.

- Fomentar el consumo local y el transporte sostenible: Cada vez es más frecuente que las ciudades se planteen de forma descentralizada, es decir, que obliguen al transporte en automóvil para las necesidades diarias como la compra o el trabajo. A pesar de que este formato es más frecuente en las urbes americanas, también se puede observar esta tendencia, aunque en menor medida, en Europa. Por eso, este proyecto plantea un edificio no solo enfocado al ámbito residencial, sino también al estilo de vida de la comunidad de vecinos que viva en él.

Por lo que el desarrollo del proyecto no solo se centra en el diseño y elaboración de un edificio desde el punto de vista arquitectónico y estructural, sino que también se contempla el análisis zonas residenciales y las necesidades que existen en los alrededores de la construcción para poder cubrirlas.

- Construcción sostenible: Debida a la situación que se presenta en el sector de la construcción con la cantidad de emisiones y residuos que genera, uno de los objetivos principales debe de ser la reducción de los mismos. Puesto que el proyecto pretende acogerse a la iniciativa del propósito Eguralt, se toma como requisito inicial la utilización de la madera como material principal para la estructura.

Además, para favorecer la construcción sostenible se tiene en cuenta la procedencia de los materiales empleados en la construcción y se pretende construir con materiales locales de kilómetro cero.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En este apartado se va a describir todo el proceso creativo del edificio, desde la primera decisión de la forma y volumen del edificio hasta las consideraciones estructurales y constructivas que se incluyen en la propuesta. Por lo tanto, esta sección se ha dividido en diferentes fases.

El primer apartado de diseño arquitectónico describe los primeros pasos que se dieron en el desarrollo de la propuesta. Se explica el punto de partida, se muestran las inspiraciones arquitectónicas y el proceso creativo que se desarrolla a partir de ellas.

Después, en la segunda fase, se explican las decisiones de distribución del edificio. Es decir, se justifican las áreas para las que se va a destinar el edificio.

Los dos siguientes apartados, son los más técnicos del desarrollo de la propuesta. Por un lado, se expone el sistema estructural que incorpora el edificio y, por otro lado, se comentan las decisiones principales relacionadas con la fase de puesta en obra del proyecto.

Por último, en el apartado final, se presentan otros sistemas y tecnologías innovadoras que se incorporan en el diseño de la propuesta.

DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Se parte del escenario de que se quiere construir un edificio en altura y que cumpla con los objetivos que se mencionan en el apartado anterior. Por tanto, se toma como punto de partida el requisito de que el edificio debe de tener una estructura principalmente de madera.

Tras realizar la investigación pertinente, y plasmada en el apartado de 'Casos de Estudio' que recoge este documento, sobre las diferentes soluciones constructivas que existen para construir con madera en altura se comienza a explorar la faceta estética y arquitectónica del edificio.

En esta etapa de investigación se seleccionan tres proyectos principales que servirían como inspiración arquitectónica para el edificio:



Ilustración 27 - Proyectos inspiración arquitectura.

- **TimberLink Award:** Este primer proyecto se trata de un complejo diseñado por la firma Enns Design para un concurso, por lo que actualmente se encuentra en la etapa conceptual, es decir, no está edificado.
- **Sneglehusene Residence:** Este proyecto realizado por BIG Architecture se encuentra situado en la ciudad danesa de Aarhus. Se trata de un edificio de cuatro plantas y de uso completamente residencial [19].
- **Dortheavej 2 Residences:** Este último proyecto, también diseñado por la firma BIG Architecture, es un complejo residencial similar al anterior, pero con 5 plantas de altura [20].

Se puede observar que todos los proyectos seleccionados comparten algunas características. Principalmente todos ellos están compuestos por elementos prismáticos superpuestos entre ellos y juegan con su acoplamiento y ubicación para crear el volumen y la silueta del edificio. Sin embargo, todos ellos son edificios de pocas plantas, lo cual no termina de encajar con la idea del proyecto.

A partir de este punto, se tiene siempre presente la inspiración de utilizar elementos modulares para la estructura y se procede a desarrollar el volumen del edificio.

Para este paso se utiliza la herramienta SketchUp, para realizar unos primeros modelos de la forma del edificio. En la siguiente *Ilustración 28* se observan las alternativas que se contemplaron y las etapas del proceso de creativo de forma esquemática:

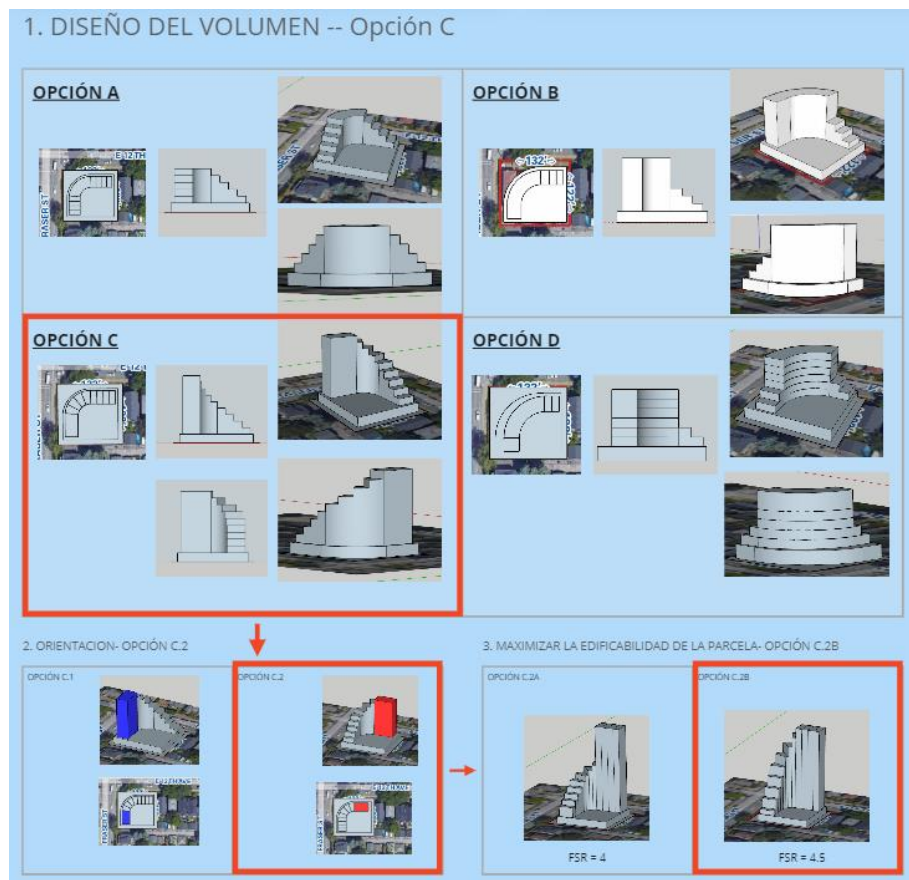


Ilustración 28 - Esquema elección del volumen del edificio.

En la primera etapa se plantearon cuatro volúmenes diferentes inspirados en los proyectos que se han citado anteriormente. Por razones simplemente estéticas y porque se pensó que sería el modelo que más características de los proyectos de inspiración podría incorporar, se optó por la opción que en la *Ilustración 28* se nombra con la letra C.

En la segunda fase se debatió la orientación del edificio. En primer lugar, se analizó que la parte del edificio que mayor número de unidades residenciales podría albergar sería la parte rectangular en forma de torre y se decidió que debería orientarse en la dirección que maximizara la luz de las viviendas. Por tanto, la torre prismática se orientaría de forma que el lado más largo esté en perpendicular a la orientación dirección sur, tal y como se muestra en la opción C.2.

Por último, se contemplaron dos formas de que el edificio creciera en altura y se maximizara así la edificabilidad. Entre las dos opciones se optó por la C.2.B., puesto que con este diseño se consigue una mayor cantidad de metros cuadrados edificadas.

Tras este proceso de diseño del volumen, se realizó un segundo boceto en SketchUp, *Ilustración 29*, con la geometría elegida y con las primeras características arquitectónicas que se había pensado introducir en el edificio, fruto de las anteriores inspiraciones.



Ilustración 29 - Boceto volumen definitivo.

En este segundo boceto se incorporó la idea de realizar ventanales en las fachadas para maximizar la entrada de luz a las viviendas, pero siempre manteniendo al menos un 40% de la fachada cubierta con elementos opacos, para evitar la estética de rascacielos. También, se añadieron los espacios verdes de los balcones, con la idea de utilizar la cara superior de los módulos que quedan en la parte del edificio que se asemeja a una escalera.

DISTRIBUCIÓN DEL EDIFICIO

Una vez completamente definido el volumen, en esta segunda fase se eligieron las distribuciones de los espacios en el edificio.

Uno de los objetivos principales mencionados para el proyecto es fomentar la reducción de desplazamiento para las necesidades diarias y el consumo local. Por lo tanto, se consideró necesario la incorporación de una zona comercial en el edificio. De esta manera, los residentes y otros vecinos de la zona podrían acceder a los comercios a pie.

Para elegir que negocios se podrían incorporar, siempre sería necesario realizar un análisis de los alrededores de la zona de la edificación e identificar cuáles son los comercios que más escasean y son más convenientes para cubrir las necesidades de los residentes.

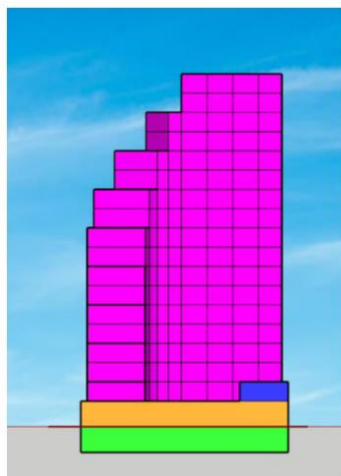
Por tanto, se decidió que toda la planta baja de la construcción, con un área de unos 1025 m², estuviese destinada a una zona comercial.

Por otro lado, con el objetivo de generar una comunidad entre los residentes y mejorar la calidad de vida de los mismo, se decidió incluir un área común para los vecinos. Esta zona de ocio situada en la primera planta del edificio cuenta con una superficie de unos 600 m² e incluye una recepción del edificio, una zona de recreo para niños y un pabellón adicional que puede albergar un gimnasio de uso exclusivo para el vecindario.

También se consideró conveniente incorporar una planta subterránea para dar cabida a una zona de aparcamiento, almacenamiento e instalaciones. Para ser coherente con los objetivos marcados en el proyecto, la zona de aparcamiento es reducida e incluye parcelas para vehículos eléctricos enchufables. Además, se decidió incorporar una gran zona de aparcamiento para bicicletas.

Por último, el resto de las plantas superiores del edificio se destinan a la zona residencial. Esta es la mayor parte del edificio, cuenta con unos 4700 m² y distintas tipologías de viviendas, entre las que se incluyen estudios y apartamentos de 2 y 3 habitaciones.

En la siguiente *Ilustración 30*, se muestra de forma gráfica la distribución general del edificio y las áreas totales destinadas a los distintos usos:



COLOR	USO	AREA [m2]
●	PARKING	1024
●	RESIDENCIAL	4704
●	COMERCIAL	1024
●	AREA COMÚN	596

Ilustración 30 - División de los usos del edificio.

A continuación, se van a mostrar las distribuciones específicas de cada una de las zonas explicadas anteriormente. Se muestran las distribuciones desde las plantas inferiores hasta las superiores.

Aparcamiento

Tal y como se ha descrito antes, en la *Ilustración 31* se muestran todos los espacios que se han incluido en la planta subterránea del edificio y su distribución.

Además, en el layout se incluyen todos los accesos hacia la planta superior. Se pueden observar dos zonas de acceso (azul y rojo), puesto que se decidió incorporar accesos diferentes para la zona residencial y para la zona comercial.

De esta forma, la zona de comunicación azul daría acceso exclusivamente a la zona comercial. Mientras que la zona roja comunica el aparcamiento con el área residencial.

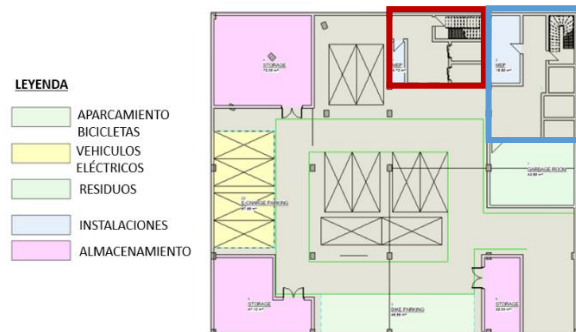


Ilustración 31 - Layout aparcamiento.

Zona comercial

En el caso de la zona comercial se muestra en la *Ilustración 32* un layout tipo, es decir, que la distribución de los comercios que se muestran en el mismo podría ser modificado en función de las necesidades que muestre la zona en la que se edifique la construcción.

En este caso se han incluido negocios típicos como un banco, restaurantes y un supermercado.

También se puede observar que en esta planta también se cuenta con los dos núcleos de comunicación, que al igual que en la planta anterior comunicarían con la zona residencial y el aparcamiento (rojo) y únicamente con el aparcamiento (azul).



Ilustración 32 - Layout zona comercial.

Zona común

En la primera planta comparten el espacio la zona residencial y la zona común de los vecinos del edificio. En la *Ilustración 33*, se puede observar la distribución que se ha seleccionado para la zona de ocio de los residentes.

La zona de la recepción incluye el núcleo de comunicación con el resto de las plantas y, además, se ha añadido una habitación para la mensajería y otra para las reuniones de la comunidad.

En el caso de la zona de juegos, se han reservado algunos espacios para áreas verdes y otras para la zona de recreo de los más pequeños.

Por último, en la parte de abajo a la derecha se encuentra el pabellón para el gimnasio, donde se incluye espacio para los vestuarios.



Ilustración 33 - Layout zona común.

Zona residencial

En la parte residencial del edificio resulta más complicado mostrar una ilustración en planta de la distribución, puesto que la geometría de cada una de las plantas va cambiando con la altura.

En el esquema de la *Ilustración 34*, se puede observar la cantidad de apartamentos de cada tipo que se ha decidido incorporar y su ubicación. Es importante recordar que uno de los objetivos del proyecto es dar cabida a distintos modelos familiares, con distintas necesidades y centrándose en aquellas tipologías de vivienda que hasta el momento no estaban tan explotadas, por lo que se decidió incorporar un gran número de unidades de tipo estudio y 2 habitaciones.



Ilustración 34 - Distribución zona residencial.

Cabe destacar, que finalmente el edificio cuenta con un total de 56 unidades residenciales y puede dar alojamiento a una media de 163 habitantes. En la siguiente *Tabla 6*, se muestra la planificación de las viviendas:

Tabla 6- Planificación de los tipos de viviendas.

TIPO DE VIVIENDA	NÚMERO	Nº PERSONAS
ESTUDIOS	23	34
2 HABITACIONES	24	84
3 HABITACIONES	9	45

Con esto queda completamente definida la distribución, lo cual es útil para comprender las necesidades del edificio también en su carácter estructural. Por tanto, en el siguiente apartado se procederá a definir el sistema estructural del mismo.

SISTEMA ESTRUCTURAL

El objetivo de este trabajo es aportar una propuesta de edificio a nivel preliminar, por lo tanto, en esta sección se va a definir la solución constructiva que se va a incorporar en el edificio, pero a nivel conceptual. Es decir, en esta sección no se aportan datos de secciones o dimensiones de los elementos estructurales que el edificio debería incluir para satisfacer las normativas estructurales, sino que se va a explicar la función que desempeñan los diferentes elementos y el sistema estructural a grandes rasgos.

Para idear un sistema estructural adecuado para esta tipología de edificio, es necesaria una documentación previa en la que se analicen otros proyectos realizados anteriormente, tal y como se ha hecho en este caso con los casos de estudios que se reflejan en apartados previos.

Se ha optado por una solución de **estructura mixta**, en la que se incluye una parte realizada con elementos de hormigón armado *in situ* y otra con módulos 3D de madera contralaminada, tal y como se muestra en la *Ilustración 35*.

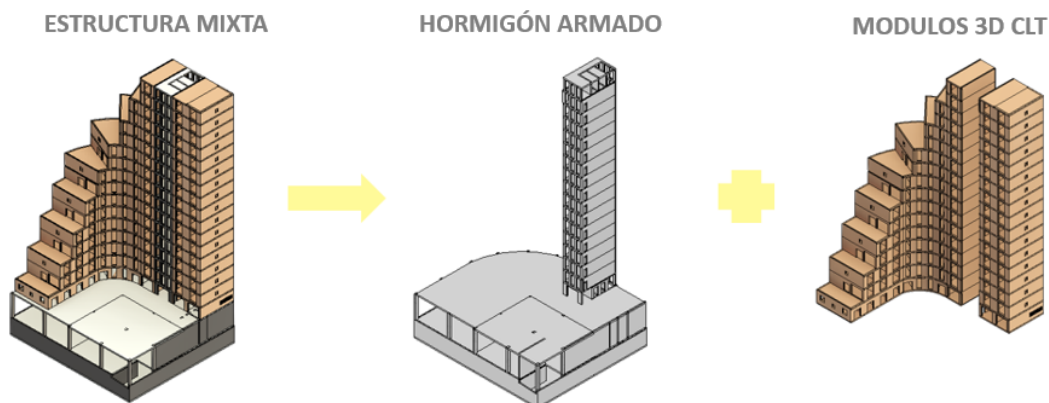


Ilustración 35 - Sistema estructural.

La solución estructural que se ha elaborado para este edificio se compone de la combinación de tres de los cuatro casos de estudio que se han analizado.

Por un lado, se ha tomado como referencia principal la estructura de la residencia Brock Commons, puesto que el edificio presenta dimensiones similares, por lo que las solicitaciones de esfuerzos serán también similares. De aquí se deduce la necesidad de incorporar un núcleo rígido de hormigón que complemente a la estructura de madera.

Además, teniendo en cuenta la geometría del edificio, se ha pensado que podrían sustituirse los elementos de dos dimensiones que se utilizaron en la estructura de madera de la residencia canadiense por elementos volumétricos previamente ensamblados en fábrica, asemejándose a la solución de la torre Apex, pero sustituyendo el acero de los módulos por elementos CLT.

Por último, para definir completamente esa estructura de madera empleando elementos volumétricos, se ha pensado en incorporar una solución de ensamblaje entre los elementos módulo similar a la que se emplea entre los módulos que conforman la vivienda residencial de Biarritz Parme.

De esta forma quedan identificados los elementos principales que conforman la estructura del edificio.

Hormigón armado

La estructura de hormigón con la que cuenta el edificio está repartida en la cimentación, planta subterránea para el aparcamiento, planta baja para la zona comercial y núcleo de escaleras y ascensores de toda la torre.

Esta estructura de hormigón es completamente necesaria para el cumplimiento de los requerimientos estructurales y desempeñar distintas funciones para el funcionamiento del edificio.

El núcleo de hormigón que se sitúa desde las plantas inferiores y se levanta hasta el último nivel del edificio presenta dos funciones principales. Por un lado, este núcleo de hormigón es el encargado de absorber las cargas laterales del edificio y trasladarlas hasta la cimentación. Por otro lado, al igual que ocurre en el ejemplo de Brock Commons, el núcleo actúa como contrapeso ante la comprobación a vuelco del edificio, ya que la ligereza de la estructura de madera no favorece este requerimiento.

En cuanto a la losa de la primera planta es necesaria para establecer la unión entre la estructura de hormigón y los módulos de madera de las plantas residenciales. De esta forma se garantiza la transmisión de las cargas verticales de la estructura.

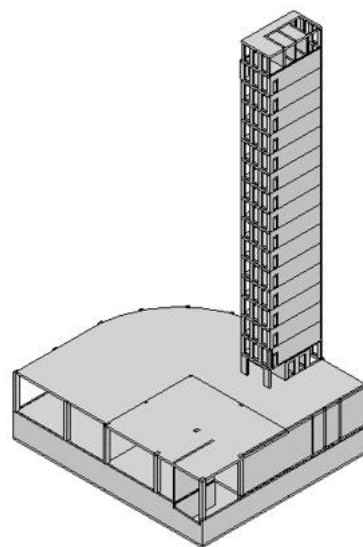


Ilustración 36 - Estructura de hormigón.

Módulos CLT

La estructura de madera que presenta el edificio tiene como principal función trasladar las cargas verticales hacia la estructura de hormigón de la planta baja. Estas cargas se transmiten desde los paneles CLT que forman los forjados de los módulos hasta los elementos verticales, también de CLT, que conforman las paredes.

Por otro lado, los paneles que componen el forjado se encuentran unidos entre sí, formando un diafragma que permite trasladar los esfuerzos horizontales hasta a estructura de hormigón del núcleo.

El edificio completo se construye utilizando 2 geometrías de módulos diferentes. Por un lado, los elementos prismáticos y, por otro, los módulos curvos.

Además, en función del diseño interior de los módulos, es decir, la distribución interior de los mismos, se han diseñado un total de 8 módulos diferentes. Dos de ellos empleados para las unidades de estudios, otros dos para los apartamentos de 2 habitaciones, tres más para los apartamentos con 3 habitaciones y, por último, un diseño para los módulos utilizados en los accesos.

Con la combinación de estas ocho unidades se ha elaborado la totalidad de la distribución de la zona residencial del edificio.

Cabe destacar, que para el diseño de estas unidades modulares se han tenido en cuenta los requisitos de transporte de los mismos a obra. Por lo que se ha jugado con las dimensiones de anchura y largura de los módulos para que la labor de transporte no sea un obstáculo para el desarrollo del proyecto. En la siguiente *Tabla 7*, se muestran las dimensiones de los módulos y el número de unidades de cada uno de los tipos que es necesario fabricar para completar la geometría del edificio en cuestión:

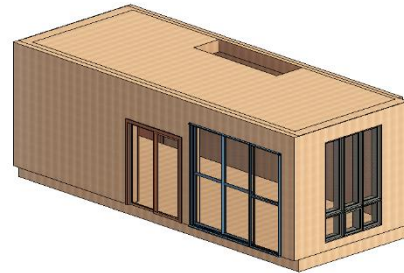


Ilustración 37 - Módulo prismático.

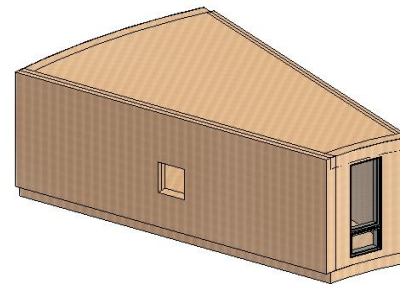


Ilustración 38 - Módulo curvo.

Tabla 7 - Dimensiones y cantidad de módulos 3D.

	ANCHO [m]	LARGO[m]	ALTO[m]
MÓDULO PRISMÁTICO			
DIMENSIONES	3,5 m	9 m	3 m
NÚMERO DE MÓDULOS:			67
MÓDULO CURVO			
DIMENSIONES (MAX)	5,2 m	9.3 m	3 m
NÚMERO DE MÓDULOS:			48
TOTAL:			115

En cuanto al nivel de prefabricación de los módulos, la idea es que estos vengan completamente terminados de fábrica, es decir, incorporen en su interior todos los elementos de particiones, instalaciones y acabados posibles, al igual que por el exterior las ventanas y puertas vengan previamente instaladas. De esta forma se reducirá al máximo el tiempo de montaje en obra.

CONSTRUCCIÓN

Una de las ventajas que presenta la construcción modular es la reducción del tiempo de puesta en obra de los edificios. Esto significa, que aumenta considerablemente la fase de fabricación de los elementos de la estructura, pero durante la etapa de construcción únicamente hay que colocar y ensamblar las piezas.

Se debe tener en cuenta que el edificio propuesto cuenta con una estructura mixta. Por un lado, presenta una estructura tradicional de hormigón *in situ*, que será el primer paso en la edificación.

La idea es que a medida que vaya aumentando la estructura de hormigón armado y esta vaya adquiriendo la resistencia necesaria, la estructura de módulos de madera vaya colocándose de forma paralela. Además, una vez izados y ensamblados los elementos modulares pueden realizarse las instalaciones finales de los elementos de fachada y acabados pertinentes. De esta forma, se reducirá aún más, si cabe, esta etapa del proyecto.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que para poder llevar a cabo esta programación de la construcción es necesario un gran control de los suministradores y sus plazos.

TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES

En este último apartado de esta sección se comentan algunos sistemas y tecnología que se consideran oportunos introducir en las instalaciones del edificio, para así aumentar la sostenibilidad y reducir la demanda energética de la construcción.

Sistema de recogida de agua

Se trata de un sistema de recogida de aguas pluviales que consiste en la captación del agua de lluvia a través de un sistema de saneamiento que la envía a un sistema de filtrado y posterior almacenamiento en unos tanques ubicados en el sótano. Después, esta agua es distribuida y reutilizada en actividades no potables, como puede ser el regado de las áreas verdes de las zonas comunes del edificio.

La instalación de estos tanques para la reutilización del agua es una forma de aprovechar un recurso natural y reducir así el consumo de agua potable. Además, es una forma de contribuir a la reducción del impacto ambiental, puesto que se reduce la demanda de energía necesaria para tratar y distribuir el agua.

Paneles fotovoltaicos

La instalación de paneles fotovoltaicos en la azotea ofrece numerosas contribuciones relacionadas con el carácter sostenible del edificio.

La incorporación de esta fuente de energía limpia y renovable ofrece a la comunidad un gran ahorro a largo plazo de los costes de la energía, a la vez de que otorga al edificio de cierta independencia energética.



Ilustración 39 - Paneles fotovoltaicos.

Fachada ventilada

Las fachadas ventiladas son sistemas arquitectónicos que funcionan mediante la creación de una cavidad o espacio entre la envolvente exterior del edificio y su revestimiento. Esta cavidad permite la circulación del aire, creando un efecto chimenea que facilita la ventilación natural del edificio. Esta circulación del aire contribuye a mantener una temperatura interior más constante, reducir la acumulación de humedad.

Este sistema ofrece grandes beneficios relacionados con la eficiencia energética, puesto que permite reducciones en el consumo de calefacción y aire acondicionado gracias a su mejora en el rendimiento térmico del edificio.

Jardines verticales

La incorporación de algunos jardines verticales en el edificio, además de favorecer la estética del mismo, ofrece otros beneficios que se deben considerar.

Por ejemplo, es beneficioso para la mejora de la calidad del aire en las ciudades. Los jardines verticales actúan como filtros naturales al absorber dióxido de carbono y liberar oxígeno. Además, también son útiles para la reducción de la contaminación acústica, ya que la vegetación en jardines verticales actúa como un aislante acústico natural, absorbiendo y dispersando el ruido del tráfico y otras fuentes de ruido, lo que mejora la calidad de vida de las personas que viven y trabajan en entornos urbanos ruidosos.



Ilustración 40 - Jardines verticales.

MODELADO

En esta última sección de la metodología seguida para desarrollar el proyecto se va a explicar el proceso de modelado y las herramientas empleadas para llevarlo a cabo.

Para realizar un modelo 3D del proyecto que permita mostrar la idea del edificio de una forma gráfica, se ha empleado principalmente la herramienta Revit, tal y como se describe a continuación.

REVIT

Tras haber realizado unos primeros bocetos utilizando el programa SketchUp para idear el volumen del edificio, una vez acotado el proyecto y decididos los rasgos principales, se decidió realizar un modelo tridimensional para poder graficar el proyecto utilizando la herramienta Revit.

Revit es una de las herramientas más potentes desarrolladas por Autodesk. Este programa no solo se trata de una forma de modelar en tres dimensiones, sino que es un modelo que se adopta a la metodología BIM.

Es decir, a través del modelo realizado en Revit se almacena toda la información necesaria en el proyecto durante toda su vida útil, desde la fase de diseño, pasando por la fase de construcción y hasta la etapa de mantenimiento.

Realizar un modelo siguiendo la metodología BIM y utilizando un programa como Revit es la clave para poder gestionar y controlar la información y el desarrollo del proyecto.

La metodología BIM permite la coordinación de las diferentes disciplinas que forman parte del desarrollo de un proyecto de construcción, es decir, gracias a la creación de un modelo inteligente y paramétrico es posible detectar las inconsistencias que puedan existir entre los distintos sistemas que forman parte de un edificio, como por ejemplo la estructura y las instalaciones.

En resumidas cuentas, la metodología se BIM permite mejora la calidad, la eficiencia y la sostenibilidad en la industria de la construcción y, por tanto, es imprescindible que se pueda incorporar en el desarrollo de los proyectos de cara al futuro si se pretende conseguir algún avance del este sector.

Por último, cabe añadir que las imágenes del modelo Revit desarrollado para este proyecto se adjuntan en el *Anexo I*.

TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT

En esta sección se van a enumerar y describir las tareas que han sido necesarias realizar para llevar a cabo el presente proyecto. Asimismo, se va a estimar el tiempo que se ha requerido para desarrollar las actividades.

TAREAS

1. DOCUMENTACIÓN INICIAL

Esta tarea incluye la recopilación de informes, artículos, libros de bibliografía y en general cualquier documentación que permita el investigar y aprender acerca de la madera como material en la construcción y la construcción modular en altura.

Además, en esta fase se ha recopilado toda la información acerca de distintos casos de estudio que posteriormente van a plasmar en el documento.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	40 h	5h

2. PLANTEAMIENTO DE LA IDEA DE PROPUESTA

Esta tarea consiste en el planteamiento del problema que recoge este Trabajo de Fin de Máster. En esta parte del desarrollo del trabajo se analiza todo lo aprendido mediante la lectura de artículos y documentación relevante y se pone en marcha la fase creativa del proyecto.

Al finalizar esta fase el edificio objeto del trabajo queda totalmente definido en su fase conceptual. Quedan determinados el sistema constructivo, los elementos de acabado, los sistemas sostenibles y tecnologías avanzadas que pretenden incorporarse en el proyecto y su justificación y objetivos que se pretenden alcanzar con su incorporación.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	32 h	6 h

3. CREACIÓN DEL MODELO

Una vez la idea de propuesta está concretada y todos los componentes del proyecto definidos, se procede a la elaboración de un modelo preliminar para plasmar todo lo que incluye la propuesta de proyecto. En este caso se ha elaborado un modelo 3D del edificio utilizando la herramienta Revit para modelarlo.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	50 h	6 h

4. REDACCIÓN DEL DOCUMENTO

La redacción de este informe se ha llevado a cabo en paralelo al desarrollo del proyecto. Durante la fase de documentación se han elaborado las secciones explicativas, como la exposición de los beneficios, el contexto y la introducción. Por otro lado, una vez finalizado todo el proceso de análisis de los diferentes proyectos, se ha redactado el apartado de los casos de estudio y finalmente, tras elaborar el modelo preliminar en Revit se han procedido a redactar la memoria explicativa de la metodología.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	65 h	10 h

5. ELABORACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

Una vez terminado el modelo, se procede a elaborar documentos gráficos que permitan visualizar el modelo desde los documentos elaborados para su presentación. Es decir, en esta tarea se sacan imágenes y Renders del modelo tridimensional elaborado en Revit.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	20 h	1 h

6. PREPARACIÓN DE LA PRESENTACIÓN

Para la presentación del proyecto se ha realizado un documento PPT en el que se muestran de forma resumida el conjunto del proyecto. Se ha realizado una labor de síntesis y esquematización de los contenidos y pasos realizados a lo largo de todo el trabajo para finalmente mostrar las conclusiones obtenidas.

	INGENIERO	DIRECTOR DE PROYECTO
Nº HORAS	15 h	2 h

DIAGRAMA DE GANTT

El siguiente diagrama muestra la gestión de los tiempos para la realización de cada una de las tareas descritas:

Tabla 8 - Diagrama de Gantt.

TAREAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
DOCUMENTACION INICIAL	■								
DESARROLLO DE LA PROPUESTA	■	■	■	■	■				
CREACIÓN DEL MODELO			■	■	■	■			
REDACCIÓN DEL DOCUMENTO		■	■	■	■	■	■	■	■
ELAVORACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN GRÁFICA						■	■	■	■
PREPARACIÓN DE LA PRESENTACIÓN									■

PRESUPUESTO

En este apartado se describen los gastos en los que se ha incurrido a lo largo del proyecto. Se van a clasificar estos gastos en dos tipos diferentes: horas del personal y amortizaciones.

Los costes de las horas internas incluyen las horas de trabajo realizadas por el alumnado y por el personal de la Escuela de Ingeniería para realizar el proyecto. Para realizar una estimación del precio, se considera que el coste de las horas personales del alumno es similar al de un ingeniero con poca experiencia, ingeniero junior.

Por otro lado, los gastos de amortizaciones recogerán el valor de los recursos empleados en la realización del proyecto.

En las siguientes dos tablas se muestra el cálculo estimado para el presupuesto. En la primera, *Tabla 9* se desglosa el presupuesto correspondiente a las horas del personal, mientras que en la segunda *Tabla 10* las amortizaciones de los materiales utilizados:

Tabla 9 - Desglose presupuesto horas del personal.

HORAS PERSONAL		INGENIERO JUNIOR	DIRECTOR DE PROYECTO
TAREAS	1. DOCUMENTACIÓN INICIAL	40 h	5 h
	2. PLANTEAMIENTO PROPUESTA	32 h	6 h
	3. CREACIÓN MODELO	50 h	6 h
	4. REDACCIÓN DOCUMENTO	65 h	10 h
	5. ELABORACIÓN RENDERS	20 h	1 h
	6. PRESENTACIÓN	15 h	2 h
TOTAL HORAS:		222 h	30 h
PRECIO POR HORA [€/H]:		30	45
SUBTOTAL [€]:		6660	1350
COSTE TOTAL:		8010 €	

Tabla 10 - Desglose presupuesto amortizaciones.

AMORTIZACIONES	RECURSOS		
	LICENCIA AUTODESK	ORDENADOR	MICROSOFT OFFICE
DESCRIPCIÓN:	Paquete necesario para el producto REVIT.	Ordenador HP.	Licencia para Word, Excel y Power Point.
COSTE TOTAL [€]:	3358	800	0
VIDA UTIL [años]:	1	4	1
USO ANUAL [horas]:	300	1000	900
TASA HORARIA [€/hora]:	11,19	0,2	0
TOTAL HORAS USO:	50	222	80
SUBTOTAL:	559,7	44,4	0
COSTE TOTAL:	604,1 €		

Por último, en la última *Tabla 11* de esta sección se muestra una tabla resumida de las anteriores y se indica cuál es la estimación del presupuesto final para el desarrollo de este proyecto:

Tabla 11 - Resumen presupuesto.

CATEGORIA DE GASTO	VALOR ESTIMADO
HORAS PERSONAL	8010 €
AMORTIZACIONES	604,1 €
SUBTOTAL [€]:	8614,1 €
IMPUESTOS (IVA 21%)	1808,9 €
COSTE FINAL:	10.423 €

Con esto se concluye que el presupuesto estimado para este proyecto de propuesta preliminar de una estructura en altura utilizando unidades modulares de CLT, sería de unos **10.423 €**

CONCLUSIONES

En el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster, se han examinado en profundidad los aspectos clave relacionados con la propuesta de construcción de un edificio en altura utilizando elementos modulares 3D de madera contralaminada. A través de este estudio exhaustivo, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Viabilidad técnica y constructiva: Se ha confirmado que la utilización de elementos modulares 3D de madera contralaminada es técnicamente viable para la construcción de edificios en altura. Los avances en la tecnología y la construcción modular respaldan esta elección.

- Sostenibilidad y compromiso ambiental: La opción de emplear madera contralaminada localmente se alinea con la sostenibilidad y el compromiso ambiental, reduciendo la huella de carbono y promoviendo la utilización de recursos renovables.

- Eficiencia y rapidez en la construcción: La industrialización de los elementos constructivos, junto con la rapidez de montaje en el lugar de construcción, destaca la eficiencia de esta metodología, lo que puede llevar a una reducción significativa en los plazos de ejecución.

- Versatilidad y adaptabilidad: La versatilidad de la madera contralaminada permite una variedad de diseños arquitectónicos y su adaptabilidad a diferentes usos y estilos arquitectónicos.

- Tendencias futuras: La adopción de elementos modulares y el enfoque en la industrialización de la construcción se alinean con las tendencias emergentes en la industria de la construcción, lo que sugiere que esta metodología tiene un potencial significativo en proyectos futuros.

Estas conclusiones revelan la viabilidad técnica, la sostenibilidad y la eficiencia de la propuesta de construcción del edificio de 18 plantas utilizando módulos 3D de CLT. Además, indican que este enfoque está alineado con las tendencias actuales y futuras en la industria de la construcción. Sin embargo, es importante destacar que, como en cualquier proyecto, existen desafíos potenciales que deben abordarse.

Estas conclusiones proporcionan una base sólida para futuros desarrollos y proyectos en el ámbito de la construcción y la tecnología de la madera contralaminada, y subrayan la importancia de seguir investigando y avanzando en esta área en busca de soluciones más sostenibles y eficientes en el sector de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Administrador. (2021, 8 noviembre). The project - EGURALT. EGURALT. <https://eguralt.eu/the-project/>
- [2] United Nation Environmental Programme. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- [3] European Panel Federation. (2021). Growing our low-carbon future. Timber for Timber. <https://europanel.org/wp-content/uploads/2021/12/WOW-TimeForTimber-Manifesto-Digital-Spreads-v4-1.pdf>
- [4] El País web (2019, 23 marzo). El mundo se rinde a los rascacielos de madera. Sandra López Letón. https://elpais.com/economia/2019/03/21/actualidad/1553167229_981390.html
- [5] Moran, M. (2023, 15 septiembre). Infraestructura - Desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure>
- [6] Moran, M. (2023a, septiembre 15). Ciudades - Desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [7] Moran, M. (2023b, septiembre 15). Consumo y producción sostenibles - desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [8] Moran, M. (2023a, septiembre 15). Cambio climático - desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [9] Brock Commons. (s. f.). <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>
- [10] Think Wood. (2017, noviembre). Brock Commons: Construction Modelling Case Study. Think Wood. <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-construction-modelling-case-study/>

[11] Think Wood. (2017, noviembre). Brock Commons Tallwood House: Construction Overview Case Study. Think Wood. <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-construction-overview-case-study/>

[12] Liven1, H. L., & Abrahamsen, R. A. (2023). MJØSTÅRNET: THE WORLD'S TALLEST TIMBER BUILDING. World Conference on Timber Engineering Oslo 2023.

[13] Maderero, D. D. F. (2019). Noruega construye el edificio de madera más alto del mundo. Forestal Maderero. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/noruega-construira-el-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo.html>

[14] BIARRITZ PARME – Egoi Wood Group. (2021, 21 octubre). Egoi Wood Group. <https://egoin.com/projects/biarritz-parme/>

[15] HTA Design LLP. (s. f.). HTA Design - Apex House. <https://www.hta.co.uk/project/apex-house>

[16] Scape Wembley | Student Living | Tide. (2023, 7 agosto). Tide. <https://tideconstruction.co.uk/projects/apex-house-wembley/>

[17] Thai, H.-T. T., Ngo, T. N., & Uy, B. U. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. The Institution of Structural Engineers.

[18] Construction Management. (2021, 5 marzo). Modular housing hits the heights in north London. Construction Management. <https://constructionmanagement.co.uk/modular-h6its-heig5hts-nor4th-london/>

[19] BIG | Bjarke Ingels Group. (s. f.). <https://big.dk/projects/sneglehusene-residences-12338>

[20] BIG | Bjarke Ingels Group. (s. f.-b). <https://big.dk/projects/dortheavej-2-residences-2442>

ANEXO I. MODELO REVIT

En esta sección se muestran algunas imágenes del modelo 3D en Revit y todos los planos de planta de los 18 pisos del edificio.

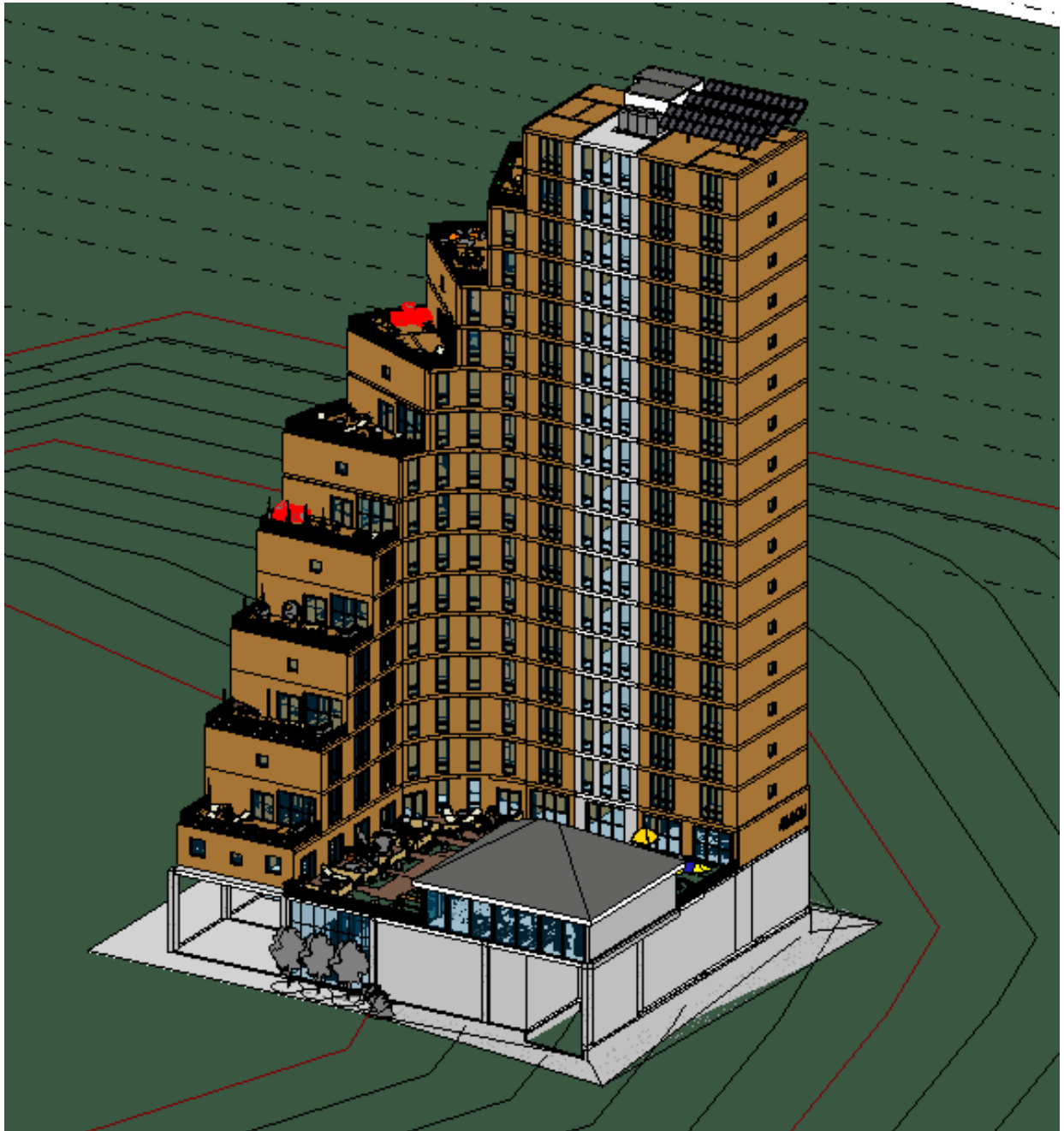


Ilustración 1 - Vista general modelo REVIT.

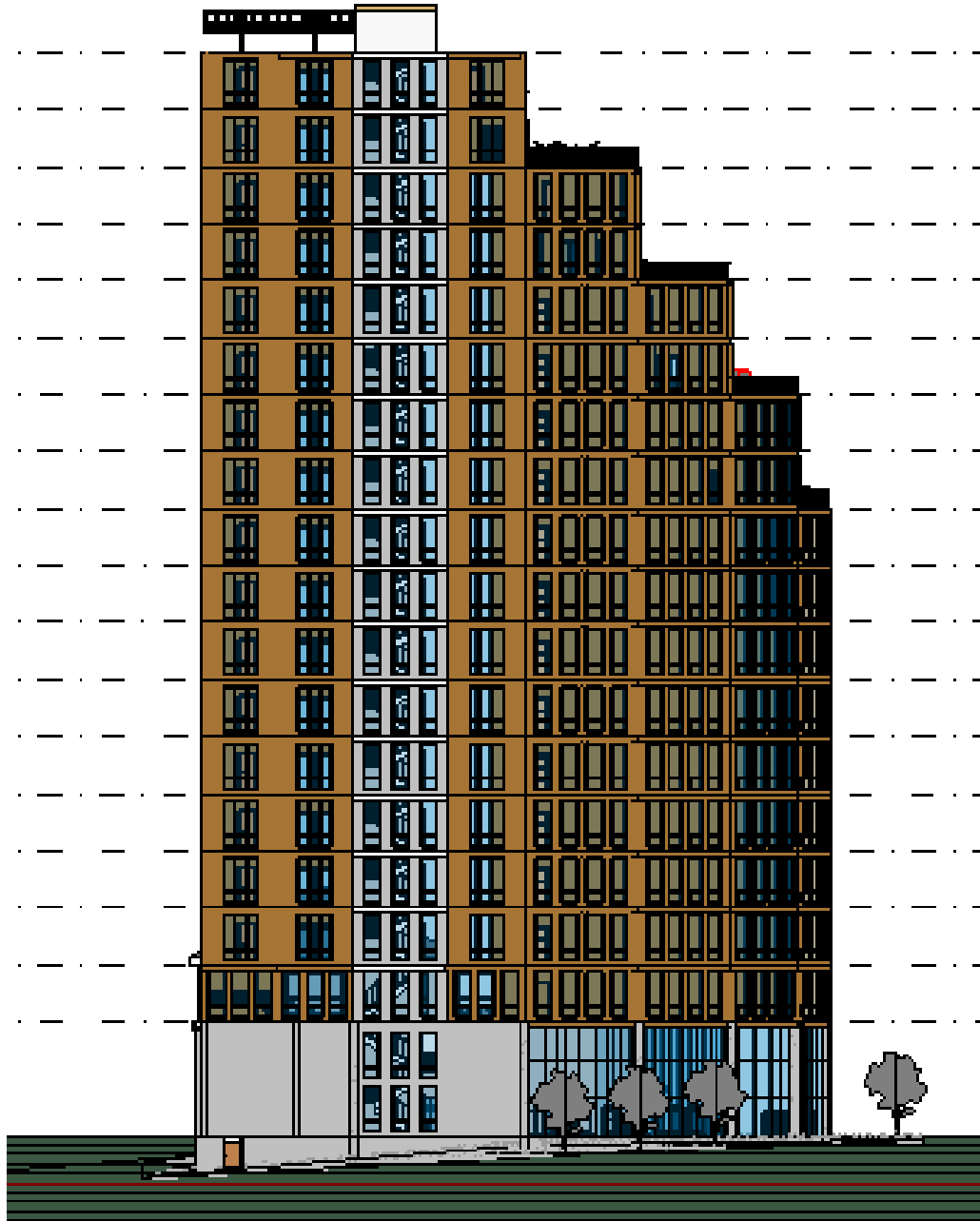


Ilustración 2 - Vista fachada norte REVIT.

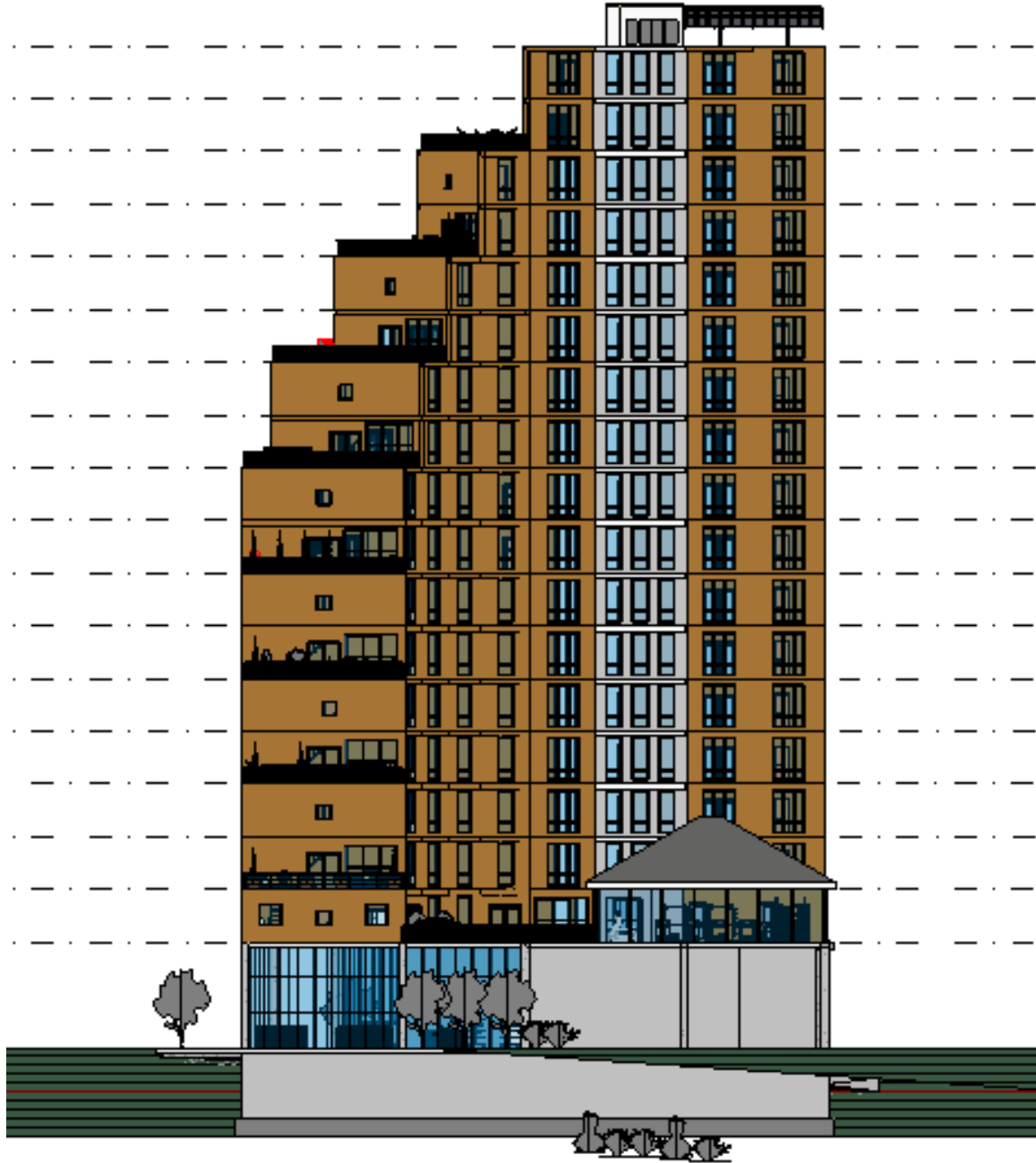


Ilustración 3 - Vista fachada sur modelo REVIT.

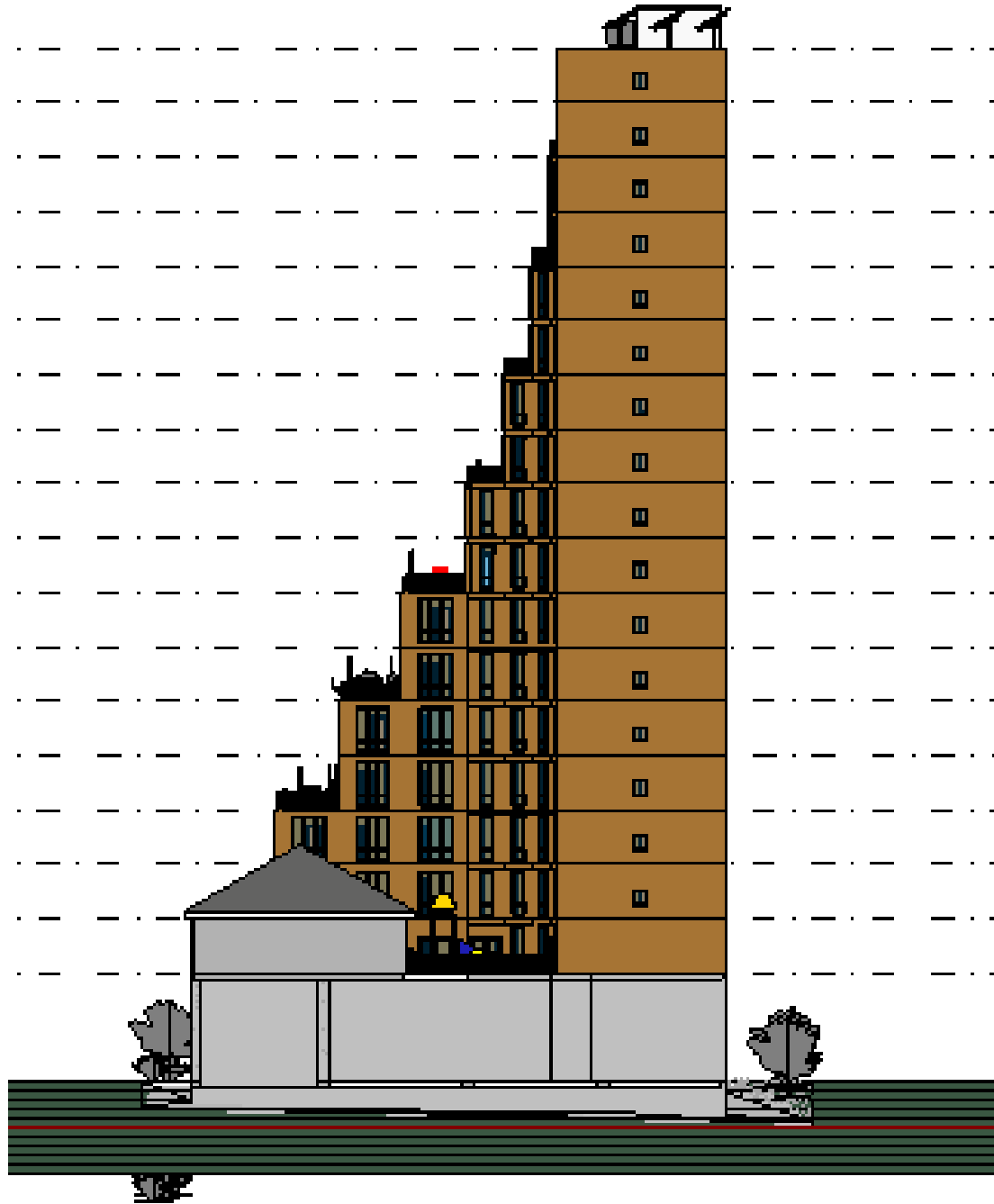


Ilustración 4 - Vista fachada este REVIT.

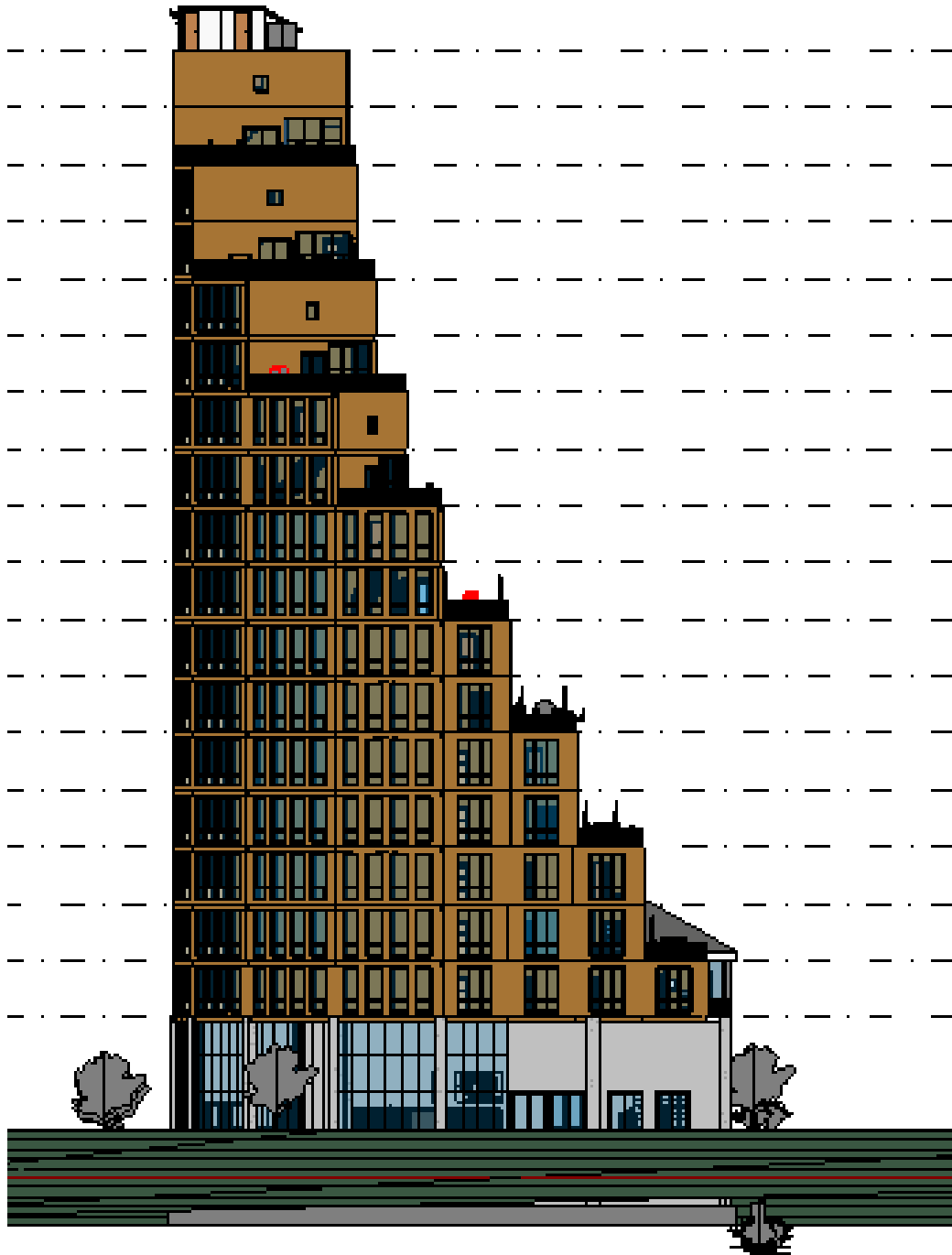


Ilustración 5 - Vista fachada oeste REVIT.

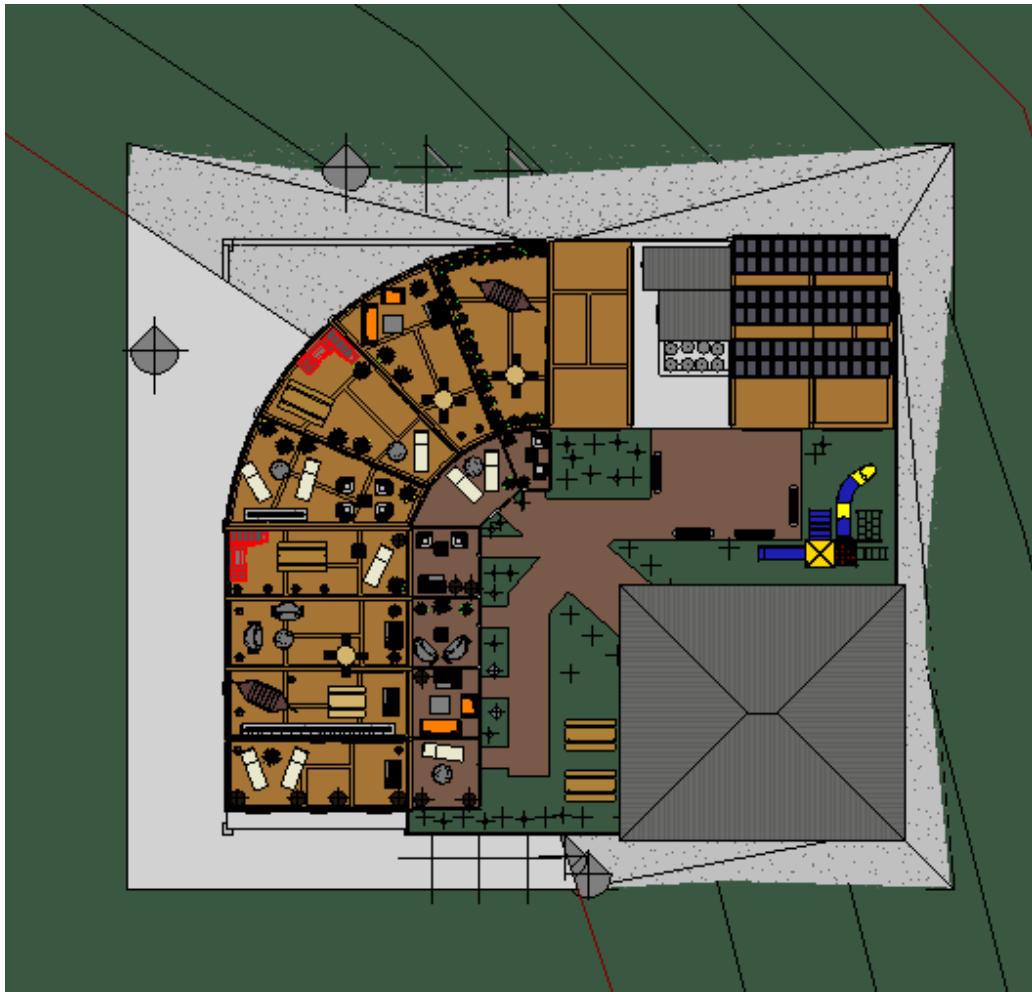


Ilustración 6 - Vista planta REVIT.

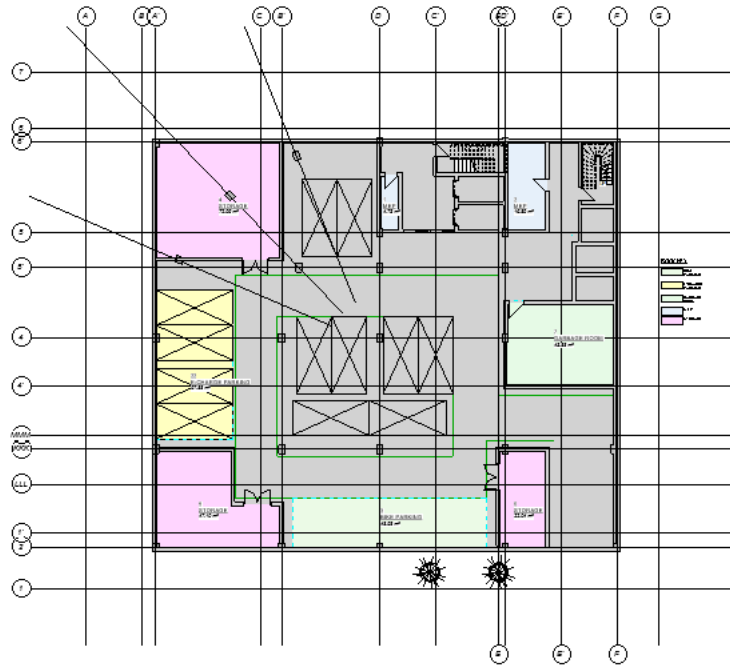


Ilustración 7 - Plano planta -1.

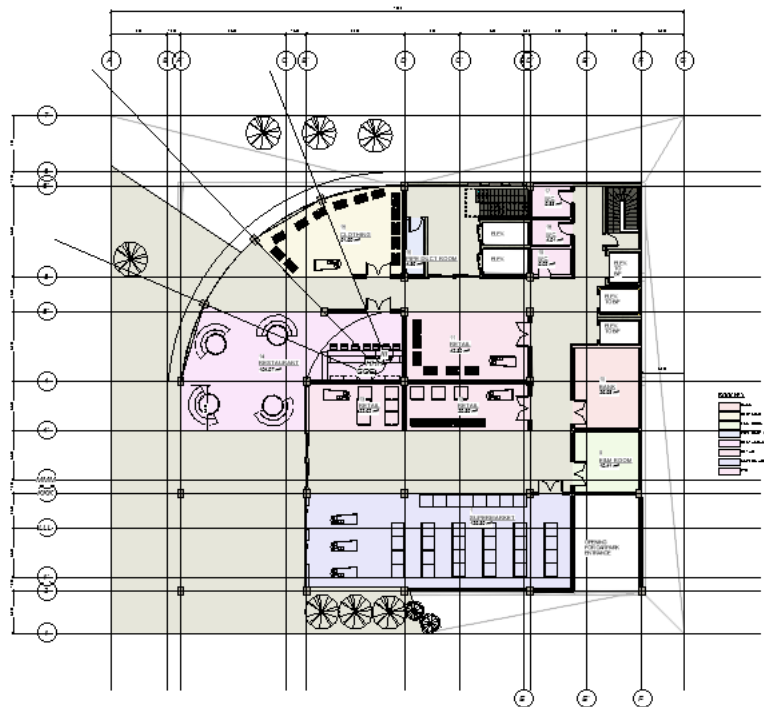


Ilustración 8 - Plano planta 0.

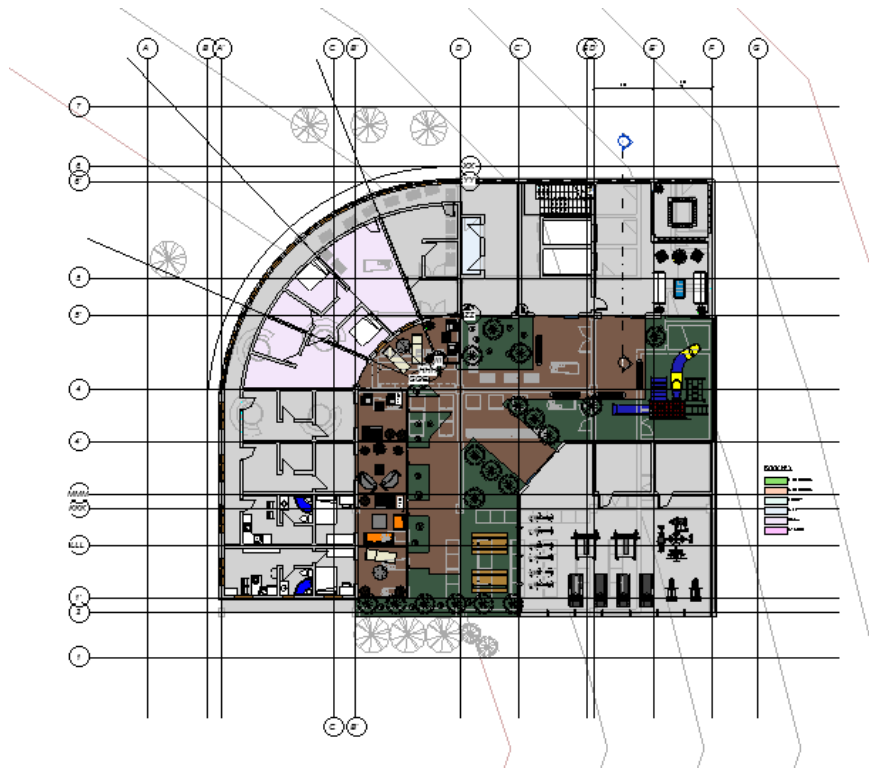


Ilustración 9 - Plano planta 1.

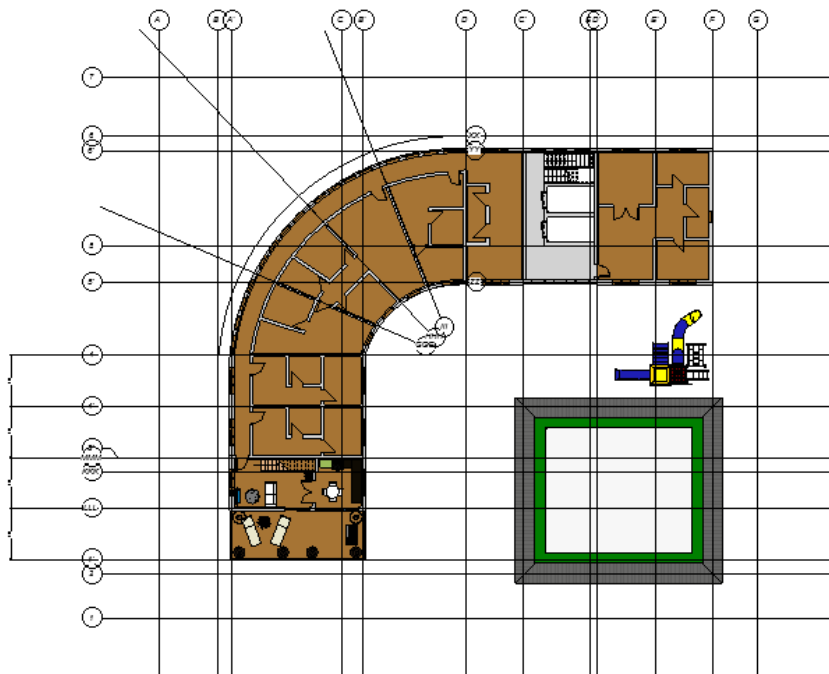


Ilustración 10 - Plano plano 2.

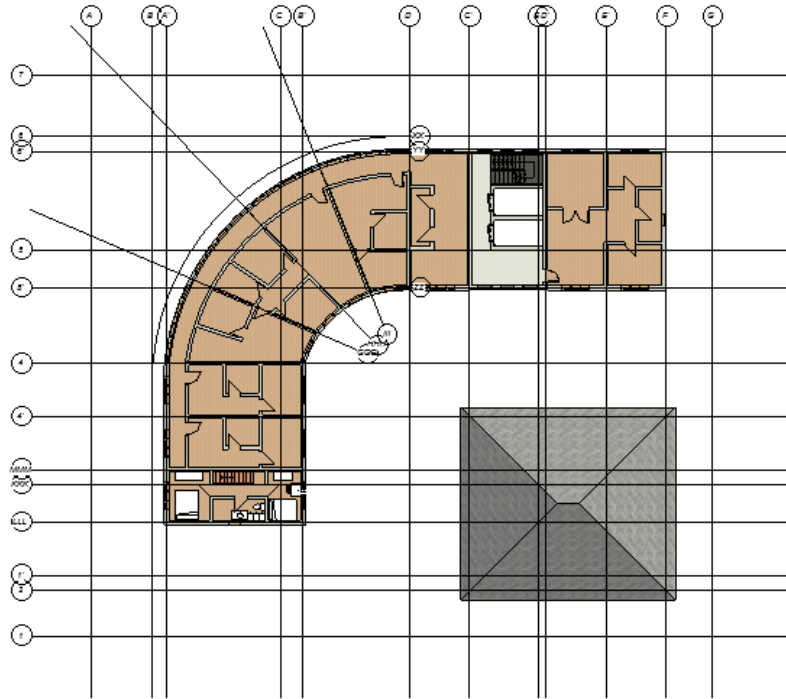


Ilustración 11 - Planta plano 3.

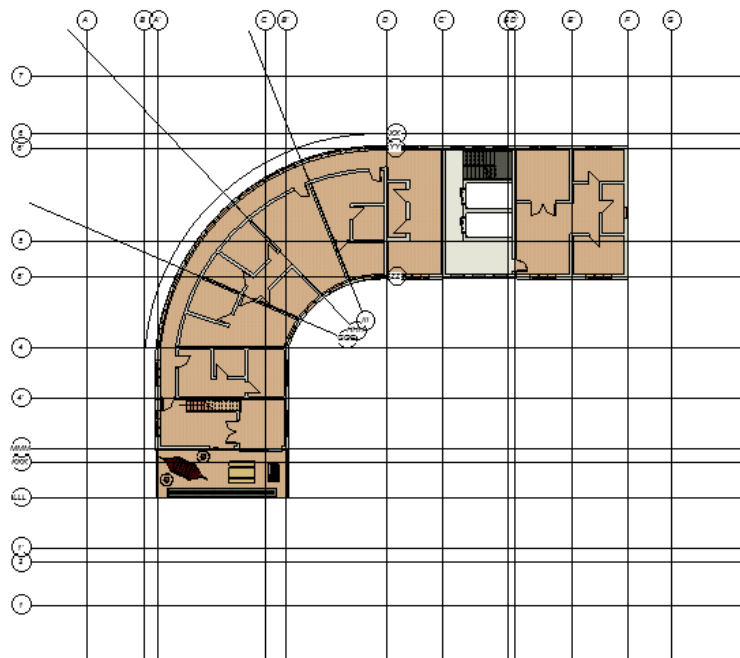


Ilustración 12 - Planta plano 4.

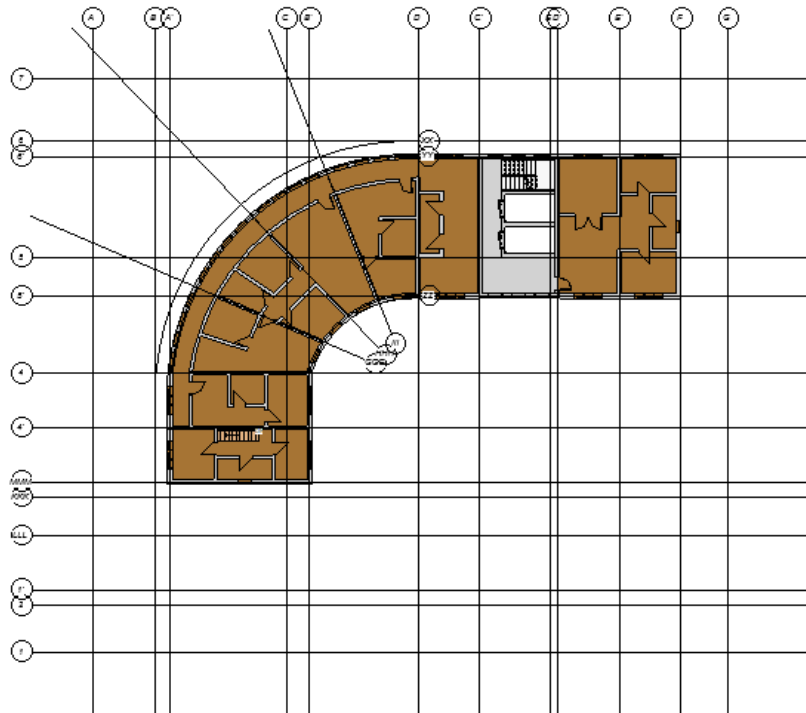


Ilustración 13 - Plano planta 5.

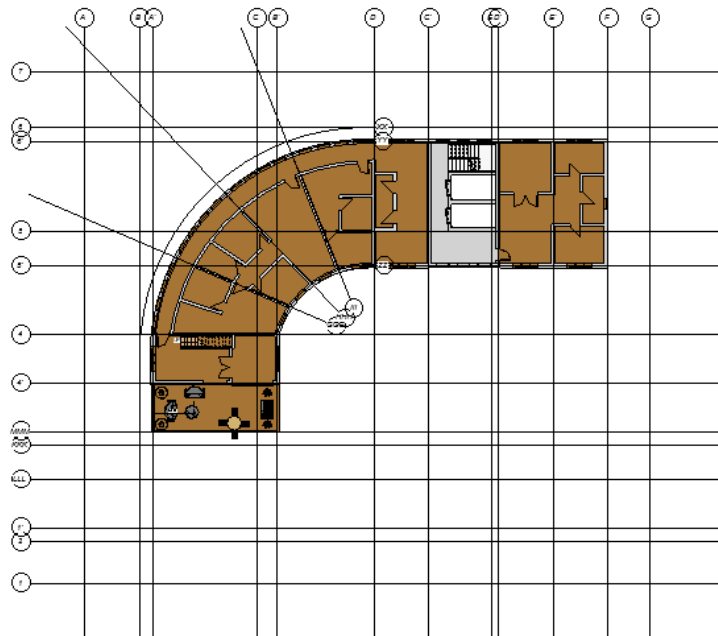


Ilustración 14 - Plano planta 6.

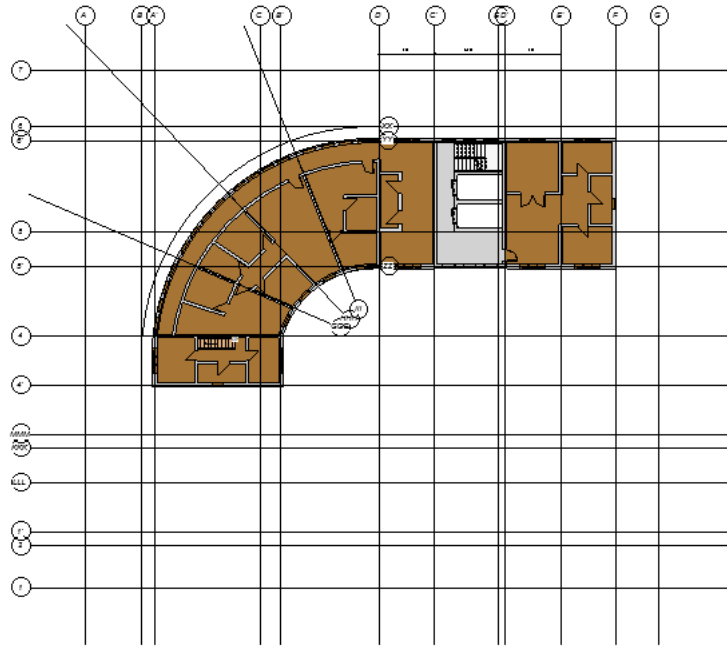


Ilustración 15 - Plano planta 7.

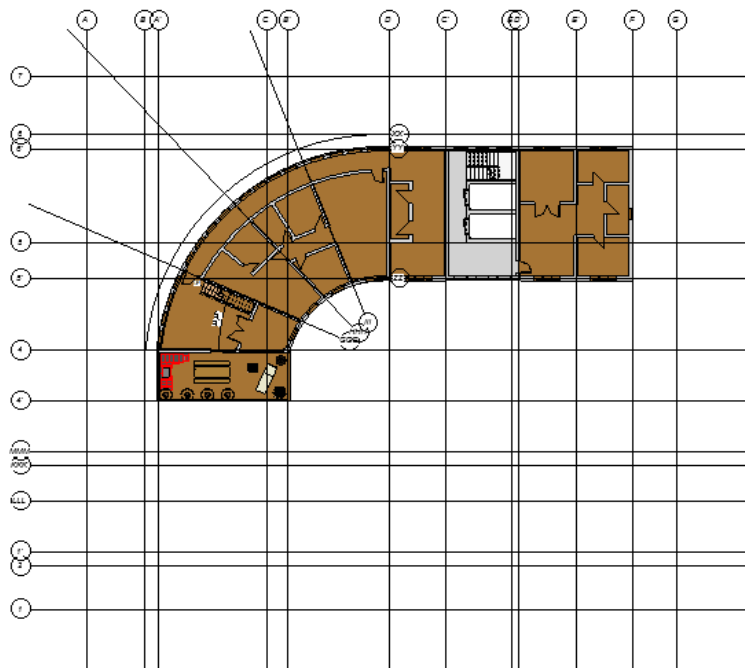


Ilustración 16 - Plano planta 8.

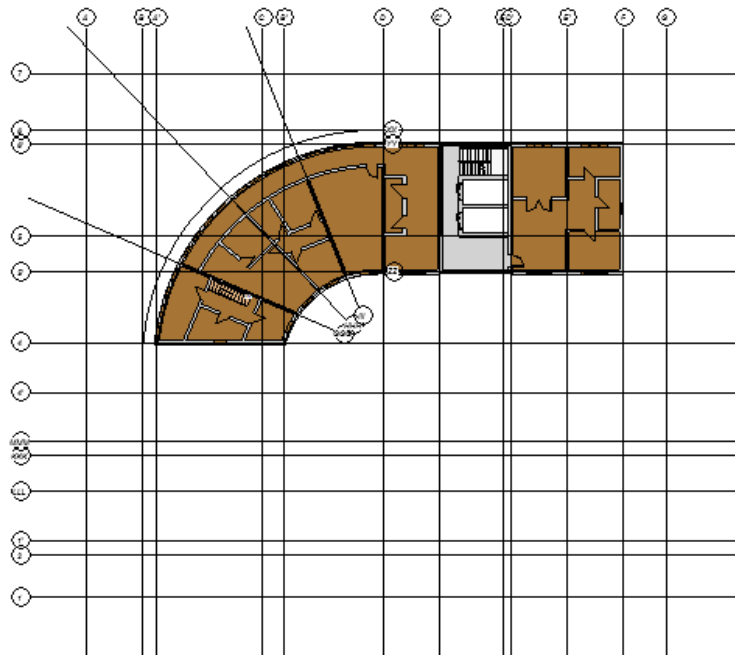


Ilustración 17 - Plano planta 9.

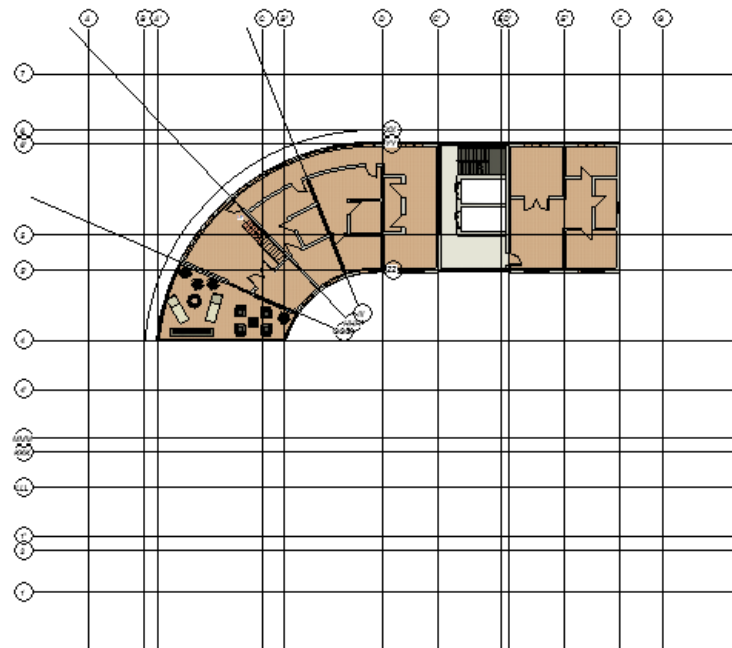


Ilustración 18 - Plano planta 10.

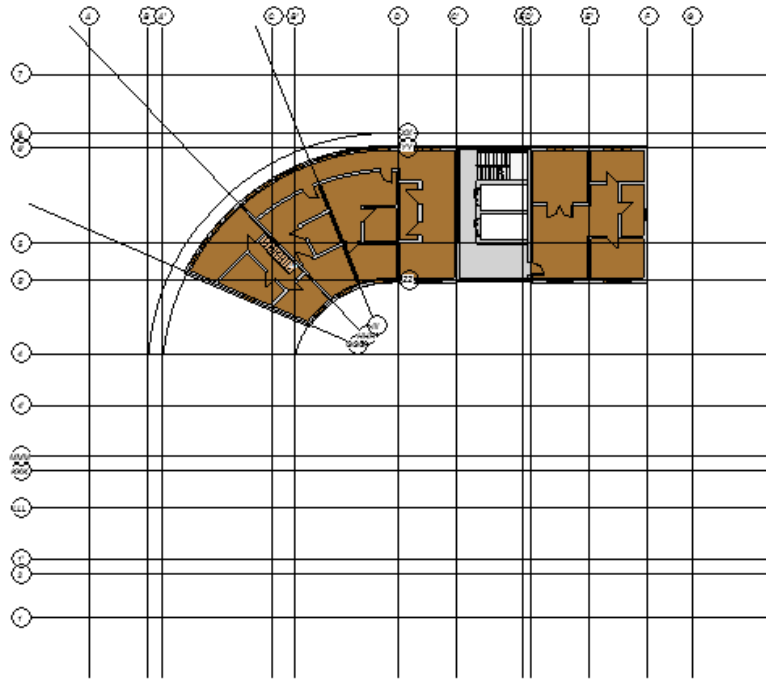


Ilustración 19 - Plano planta 11.

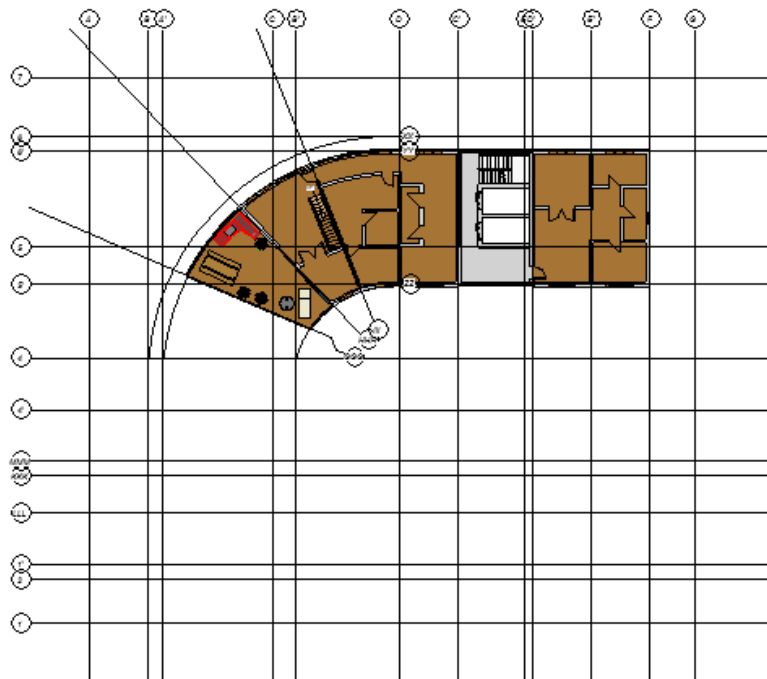


Ilustración 20 - Plano planta 12.

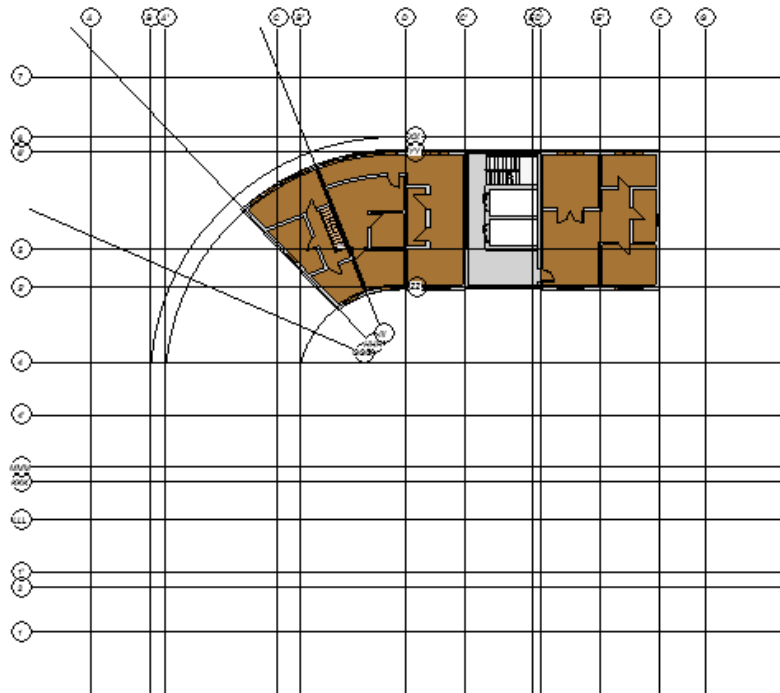


Ilustración 21 - Plano planta 13.

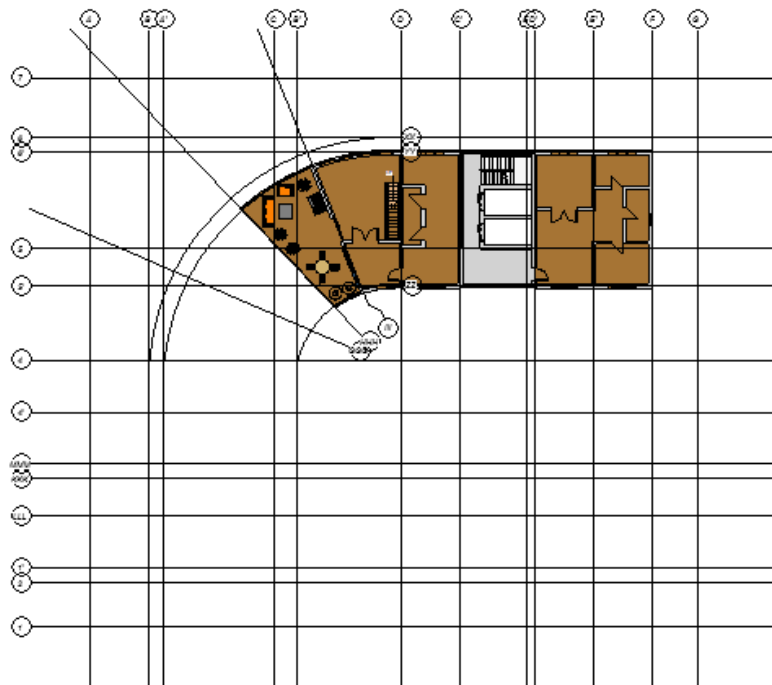


Ilustración 22 -Plano planta 14.

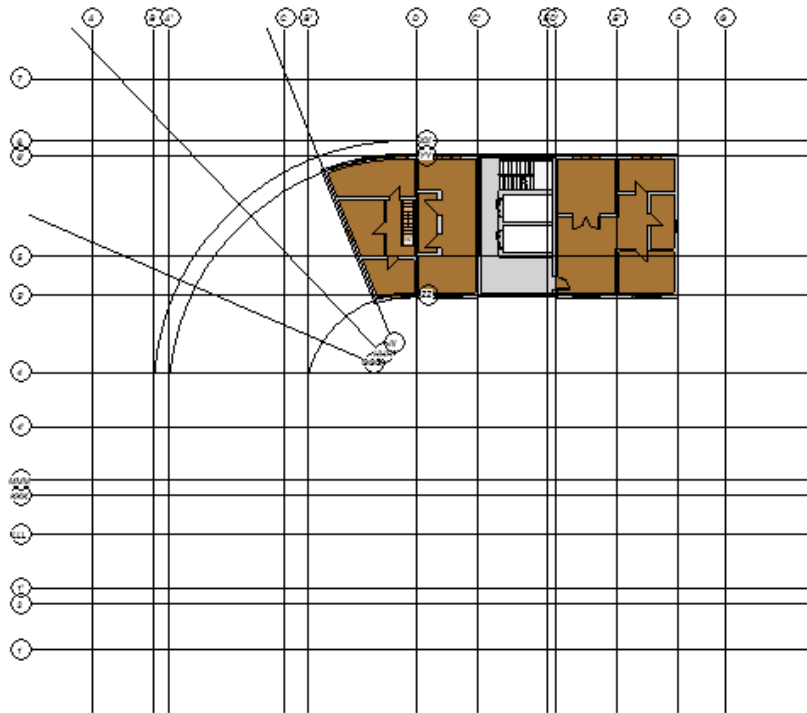


Ilustración 23 - Plano planta 15.

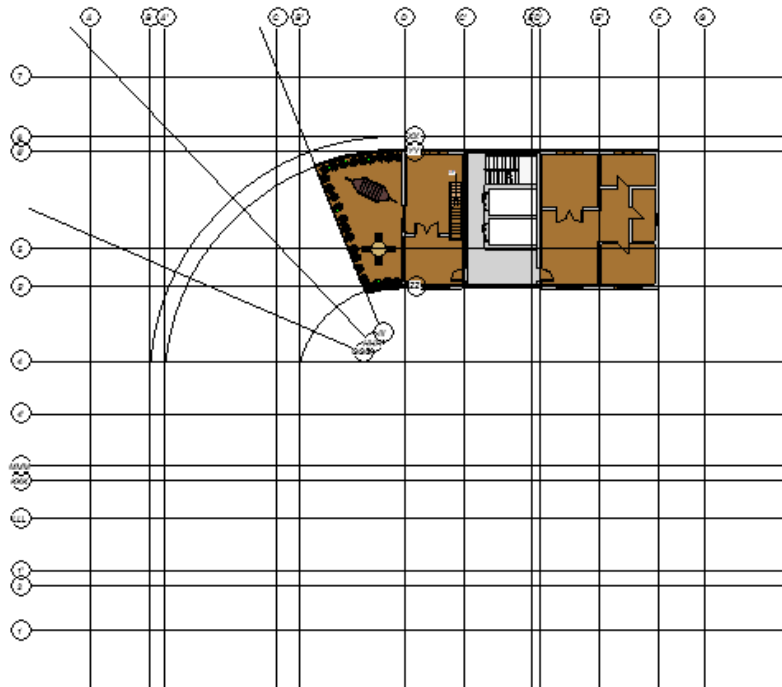


Ilustración 24 - Plano planta 16.

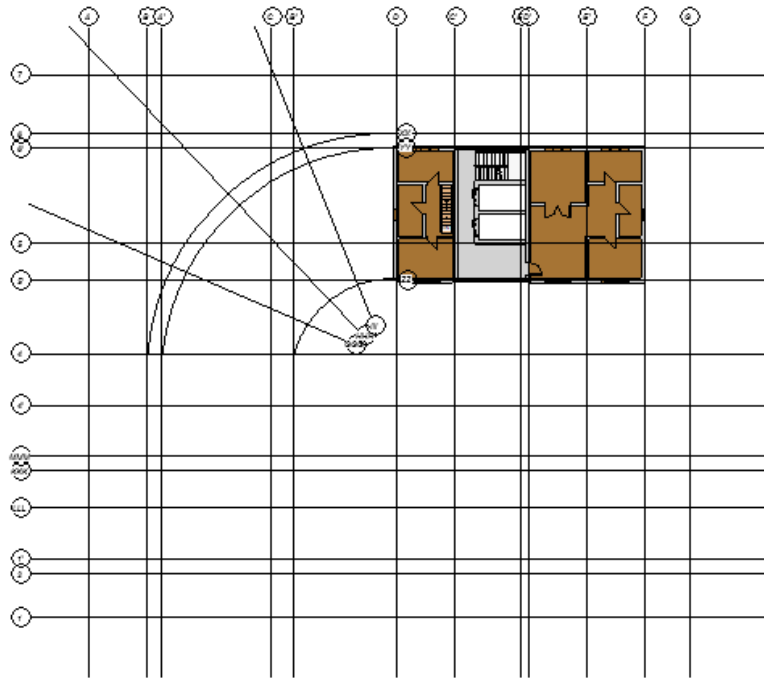


Ilustración 25 - Plano planta 17.

ANEXO II. RENDERIZADO

Se adjuntan en este anexo algunas imágenes realistas del edificio, tanto por el exterior como por el interior.



Ilustración 1 - Vista aérea general.



Ilustración 2 - Vista aérea últimas plantas.



Ilustración 3 - Vista desde la calle esquina.



Ilustración 4 - Azotea.



Ilustración 5 - Vista aérea balcones.



Ilustración 6 - Vista aérea primeras plantas.



Ilustración 7 - Vista general.



Ilustración 8 - Vista aérea zona común.



Ilustración 9 - Zona común y terrazas.



Ilustración 10 - Gimnasio.



Ilustración 11 - Repección del edificio.