

Método para la dirección de obra de viviendas modulares pasivas

Method for construction management of passive modular houses

Carolina Meire^(*), Patricia Linhares^(**), Víctor Hermo^(***)

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño y comprobación de un innovador método de dirección de obra para construcciones modulares pasivas, alineado con la metodología lean construction - Last planner system. Y que, a su vez, garantice los criterios de diseño de una construcción ecoeficiente.

Motivado por la complejidad que reside en la ejecución de construcciones modulares. Se define esta guía con el objetivo de potenciar la eficiencia de la puesta en obra y asegurar un alto grado de industrialización. Para ello se detallan las singularidades de las fases de ejecución, los hitos de verificación y se estudian los errores recurrentes y su subsanación.

El documento concluye con la obtención de resultados significativos sobre los parámetros que garantizan la productividad de la construcción “plazo, coste, calidad y sostenibilidad”.

Palabras clave: guía de dirección de obra; construcción industrializada; construcción modular ligera; construcción pasiva; lean construction; Last Planner System.

ABSTRACT

This article presents the design and verification of an innovative construction management method for passive modular constructions, aligned with the lean construction - Last planner system methodology. In addition, that in turn, guarantees the design criteria of an eco-efficient construction.

Motivated by the complexity that resides in the execution of modular constructions. This guide is defined with the aim of enhancing the efficiency of commissioning and ensuring a high degree of industrialization. For this, the singularities of the execution phases, the verification milestones are detailed, and recurring errors and their correction are studied.

The document concludes with the obtaining of significant results on the parameters that guarantee the productivity of the construction “term, cost, quality and sustainability”.

Keywords: construction management guide; industrialized construction; lightweight modular construction; passive construction; lean construction; Last Planner System.

(*) Ingeniero de Edificación Universidade da Coruña. ETS Arquitectura 15071, A Coruña (España).

(**) Dr. Arquitecto. Profesora Contratada Interina. Universidade da Coruña. ETS Arquitectura 15071, A Coruña (España).

(***) Dr. Arquitecto. Profesor Contratado Doctor. Universidade da Coruña. ETS Arquitectura 15071, A Coruña (España).

Persona de contacto/Corresponding author: carolina.meire@udc.es (C. Meire)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8850-3168> (C. Meire); <https://orcid.org/0000-0002-8267-5372> (P. Linhares) <https://orcid.org/0000-0003-0283-0852> (V. Hermo)

Cómo citar este artículo/Citation: Carolina Meire, Patricia Linhares, Víctor Hermo (2023). Método para la dirección de obra de viviendas modulares pasivas. *Informes de la Construcción*, 75(572): e520. <https://doi.org/10.3989/ic.6452>

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 20/03/2023
Aceptado/Accepted: 19/10/2023
Publicado on-line/Published on-line: 12/12/2023

1. INTRODUCCIÓN

Nuevas empresas han detectado la oportunidad y han introducido el concepto de construcción modular, que se refleja en la abundancia de literatura científica reciente en torno a esta temática. Que van desde, la revisión de los aspectos técnicos de la planificación y coordinación de la construcción modular, (1) pasando por las destacables ventajas de los sistemas de CML, tanto económicamente como ambientalmente (2), el uso de softwares en los sistemas de edificación industrializados (3), hasta el estudio de secuencias de re fabricación en operaciones de ensamblaje de construcciones industrializadas (4).

En este contexto, el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) informa que más del 32% del gasto total de energía mundial y el 19% de las emisiones totales de GEI (gases de efecto invernadero) se deben a los procesos energéticos de los edificios (5-7). Tal y como explica Santamouris 2013 (8) la construcción presenta un consumo energético muy elevado en comparación con otros sectores. Se deben garantizar los nuevos estándares de sostenibilidad exigidos por el horizonte 2020 (9). Siendo el principal instrumento para alcanzar estos objetivos en el sector de la construcción las Directivas Europeas relativas a la eficiencia energética de los edificios (EPBD) (10) y más concretamente la Directiva 2010/31/UE (EPBD) (11) garantizando que para 2021 todos los edificios de nueva construcción, fuesen de consumo de energía casi nulo (nZEB) (12, 13).

Por lo tanto, se pretende potenciar la competitividad del sector con marcada tendencia hacia la industrialización, el cual debe ser más eficiente y con un mejor comportamiento medioambiental. Y contar con una metodología optimizada que permita eliminar los desvíos en plazos y costes tan habituales en la construcción convencional. La productividad del sector es una materia que preocupa y genera diversos debates acerca del modelo de producción adecuado para mejorar su rendimiento (14). Asimismo, en comparación con otras industrias, su productividad, en las últimas décadas, ha sido muy baja (15).

De los métodos de referencia que miden la productividad en la construcción destaca el Lean Construcción (16), un sistema de planificación y control de la producción que busca maximizar el valor del proceso constructivo y disminuir la incertidumbre y variabilidad en el flujo de trabajo para alcanzar compromisos confiables (15) y más concretamente el Last Planner System (LPS), desarrollado por Ballard y Howell (17) para mejorar la fiabilidad de la planificación, aumentar la productividad de la construcción, garantizando un flujo de trabajo sin interrupciones (18). Este sistema de planificación y control de la producción ha transformado a nivel operacional y gerencial la industria de la construcción (19, 20), identificando desafíos a los que se enfrentan los profesionales de la construcción durante la implementación (21) y los beneficios (22) del uso de LPS. Destacando la importancia de la implicación de la organización en el proceso de la planificación. (23).

En España el uso de este tipo de metodologías, con una alta capacidad de aplicación, es relativamente reciente (24), destaca el porcentaje de conocimiento y la revisión de la literatura de Hoyos (19) y el potencial de implantación de la guía

editada por el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) (25), actuando sobre los 3 factores más influyentes en la eficiencia y productividad de la puesta en obra; la calidad de lo ejecutado, el plazo, el coste.

A mayores, debemos tener muy en cuenta el factor sostenibilidad, tanto durante la construcción, como garantizando una mayor eficiencia de las edificaciones durante la fase de uso. Existen diversos, sellos de sostenibilidad, como Leed, Broom o Verde. Considerando un gran referente el mundialmente reconocido estándar Passivhaus. Donde, la definición original según Feist 2005 (26), “Una casa pasiva es una edificación en la que el confort térmico (ISO 7730) se garantiza solo por calentamiento o refrigeración del flujo de aire, de acuerdo al volumen de intercambio requerido para la calidad del aire interior (DIN 1946) sin utilizar ayuda adicional al aire recirculado”. Y a su vez, los criterios para cumplir el estándar fueron definidos por Gantolier 2010 (27).

Para garantizar dichos requisitos, es imperativo que las casas construidas según los estándares actuales cumplan con las expectativas de un diseño energético detallado (28, 29), durante la etapa de ejecución. Puesto que a menudo, tal y como lo describe Pieter de Wilde (30) “hay una diferencia significativa entre el rendimiento energético previsto (calculado) de los edificios y el uso real de energía medido una vez que los edificios están operativos.” Y una de las principales razones identificadas para esta brecha de rendimiento energético son las prácticas deficientes durante la puesta en obra.

Surge el reto y por lo tanto una oportunidad detectada en el sector, de una nueva visión de la dirección de obra, que tendrá que estar adaptada a las circunstancias de su tiempo y a las necesidades del momento en el que vivimos, que garantice una optimización de los procesos y la calidad de los resultados. Y todo ello bajo el enfoque de la sostenibilidad durante la fase de ejecución y que además tendrá en cuenta los ahorros y aspectos positivos durante la etapa de uso de las edificaciones.

Concebido gracias a la experiencia adquirida durante el desarrollo y materialización en los proyectos de investigación de sus predecesores científico-técnicos (31-34), de la mano de la Universidad de la Coruña. El sistema constructivo (35) fue optimizado y diseñado con el objetivo primordial de una puesta en obra ágil, de calidad, sostenible y sin desvíos en el presupuesto. No obstante, tras la construcción de las primeras viviendas, surgen diversas dificultades que afectan a la productividad de la etapa de ejecución.

El objeto de la investigación es la creación de un Método de dirección de obra de construcciones modulares pasivas, que garantice la mejora de la productividad durante las fases de ejecución.

2. METODOLOGÍA

El foco de esta investigación se origina en Proyectopía, una empresa de base tecnológica ubicada en Galicia, que avalada por organismos autonómicos y nacionales de investigación (CDTI y GAIN) ha creado un innovador sistema modular de aluminio extruido “Walluminium,” para la construcción de viviendas unifamiliares de bajo consumo

energético. La motivación de este artículo aflora tras la ejecución de varias viviendas en las que surgieron errores recurrentes en obra que afectaban a la productividad de las mismas.

Se define la investigación, a través de un proceso de diseño y comprobación; 1. Construcción de las primeras viviendas modulares Walluminium, 2. identificación de los errores recurrentes en obra, se plantean procesos de mejora, se constata la necesidad de la creación de una guía de obra que determine los procesos y las características especiales de este tipo de construcción modular pasiva. 3. Se toma como referencia la publicación por el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (25), y se procede con la 4. creación de la guía de dirección de obra alineada con la metodología lean construction y más concretamente con Last planner system, que, a su vez, garantice el cumplimiento de los estándares pasivos. 5. Se determina la estructura de desglose de trabajo y la organización de los agentes en las obras modulares pasivas, 6. posteriormente se identifican y planifican las de fases de ejecución. 7. Se comprueba la aplicación del método de dirección de obra Walluminium, con la puesta en práctica durante la ejecución de tres obras concretas; "Porriño MFR, Boiro CSH y Cangas MMG". 8. Se identifican los errores y 9. se optimiza el manual. Por último, 10. se estudian los resultados obtenidos, y se comparan con las publicaciones de referencia y experiencias más recientes valorando las ventajas del método de dirección de obra, y los beneficios de su utilización, respecto a los parámetros principales objeto de estudio; plazo, coste, calidad y sostenibilidad.

3. TEORÍA Y CALCULOS

3.1. Problemática de la construcción modular

Percatándonos de que la problemática de la dirección de obra modular, residía en la complejidad y novedad de su puesta en obra.

En general, problemas de incumplimiento de plazos, derivados del desconocimiento de la industrialización del sistema, con la falta de coordinación entre taller y obra. Desvíos de presupuesto, debidos a que la correcta ejecución de las partidas no se materializaba a la primera, conllevando la necesidad de rehacerlas. A su vez, la mano de obra no cualificada o con inexperiencia en este tipo de construcción modular, así como, con creencias y experiencia en obra convencional, actuaban en nuestra contra. Advertimos que la puesta en obra, conllevaba asociadas diversas dificultades que son comunes a la construcción convencional (24, 25, 36), así como, a otras derivadas de la problemática de la construcción modular e industrializada (37-39). Dichos errores recurrentes en nuestras obras son identificados y agrupados en función de los parámetros de medida a los que afectan: plazo, coste, calidad y sostenibilidad.

Incumplimiento de plazos:

- Incorrecta estimación del cronograma, motivado por el desconocimiento de plazos, al no existir experiencias previas de ejecución.
- Desvíos en los plazos de suministro de materiales (falta de antelación y/o previsión, desconocimiento de los plazos de suministro, listas de espera).

- Problemas de planificación, derivados de la mala coordinación entre subcontratas, que impiden el correcto avance según el cronograma determinado.
- Bajo grado de industrialización, con escaso aprovechamiento del potencial de fabricación de elementos en serie en taller.

Aumento del Coste total de la obra

- Incorrecta planificación de elementos auxiliares (sin el aprovechamiento de los mismos cuando están en obra, surgiendo la necesidad de volver a solicitarlos una vez se han retirado).
- Necesidad de compra de suministros con urgencia a proveedores que no eran de confianza, y con los que no existían acuerdos previos del coste del material, o de compra por volumen.
- Penalización económica, causada por la entrega de obra fuera del plazo establecido en contrato con la propiedad.

Calidad de la ejecución cuestionable

- Problemas por la falta de formación de los operarios en un sistema constructivo industrializado innovador.
- Avance en tareas decisivas sin la verificación y conformidad por parte de la Dirección facultativa, conllevando el tener que repetirlas correctamente.

Sostenibilidad comprometida

- Aislamiento interrumpido, generando puentes térmicos. Errores en la instalación de las carpinterías exteriores sin mantener la rotura de puente térmico.
- Incorrecta instalación de la barrera de vapor. Deficiencias en sellados.
- Envoltente sin garantizar la continuidad de la capa hermética alrededor de todo el volumen calefactado.
- Escasa formación de las subcontratas en materia de construcción sostenible y requisitos de las edificaciones pasivas.

Se hace patente la necesidad de definir un método, una guía de dirección de obra que garantice el cumplimiento de plazos, objetivos, sin desvíos en el coste y asegurando un alto estándar de calidad. Así como, garantizando la sostenibilidad de las construcciones. El éxito del sistema constructivo depende realmente de la perfecta puesta en obra.

Se determinan a continuación los puntos relevantes para la dirección de obra:

3.2. Presentación del manual

El manual para la dirección de obra de las viviendas Walluminium, define la realidad de la puesta en obra del sistema constructivo, está alineado con la metodología Lean construction y más concretamente con la metodología Last planner system.

3.2.1. Planificación maestra

- **Objetivo principal:** la construcción de una vivienda modular pasiva Walluminium.
- **Alcance:** 6 meses, desde el acta de replanteo.

- **Identificación de los stakeholders:** cliente, administración, medioambiente, DF, contratas, proveedores.
- **Estructura de desglose de trabajo (EDT)** Identificamos en la Figura 1 tres niveles:
 - » Nivel 1: construcción vivienda modular pasiva
 - » Nivel 2. Fases 7
 - » Nivel 3. Actividades de cada fase
- **Estructura de organización de agentes en obra** (Figura 2) de una vivienda modular pasiva:

- Identificación de recursos críticos (equipos materiales, mano de obra)
- Coste de las actividades y totales por cada subcontrata

Tabla 1. Plan de fases de vivienda modular pasiva.

PLAN DE FASES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6
Fase 1 PLP	█					
Fase 2 Estructura		█				
Fase 3 Envolverte Hermética			█			
Fase 4 Pre Instalaciones				█		
Fase 5 Tabiquería y Aislamientos					█	
Fase 6 Carpintería interior						█
Fase 7 Urbanización						█

3.2.2. Planificación de fases generales del proyecto

Con el objetivo principal de definir y validar el trabajo a realizar para cumplir con cada hito de la obra. (25). En esta planificación (Tabla 1.) participan todos los responsables de cada actividad y áreas funcionales del proyecto, siendo fundamental la alineación de objetivos y estrategias para la correcta ejecución de cada fase, se establecen a su vez los objetivos complementarios:

- Análisis de riesgos del proyecto.
- Definición de la estrategia de trabajo a seguir

El plan de fases para la ejecución de una vivienda modular pasiva se establece en 26 capítulos y 7 hitos de comprobación.

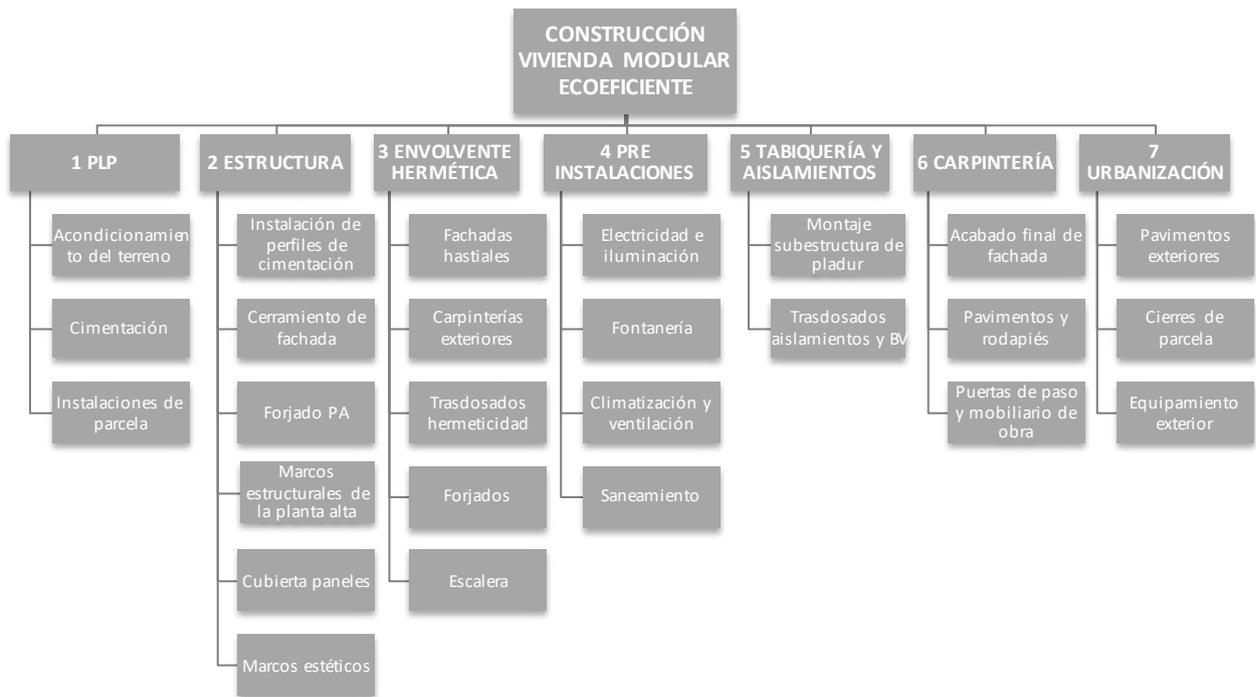


Figura 1. Estructura de desglose de trabajo.



Figura 2. Estructura de organización de agentes en obra.

Los capítulos se agrupan en 7 fases y cada una de ellas está asociada a la verificación y comprobación de los hitos correspondientes que, sin la aprobación de los mismos por la Dirección Facultativa, no se permite el proceder con las siguientes fases de ejecución de la obra.

Pull sesion: Reunión en la que cada responsable identifica los rendimientos, recursos y restricciones necesarias para comenzar y finalizar las tareas según lo planificado. La bibliografía al respecto menciona que lo habitual son dos pulls sesión en viviendas unifamiliares (25) no obstante, las características del sistema constructivo industrializado hacen posible el organizar la totalidad de la obra ágilmente en una única sesión. Por nuestra trayectoria previa ejecutando viviendas modulares sin método (tal y como se describe en la metodología), disponemos de un listado de errores recurrentes y restricciones en obra, que se hacen visibles en esta reunión, con el objetivo de valorar conjuntamente con el equipo de trabajo las mejores posibilidades de subsanación. Se determina la duración efectiva de cada tarea suponiendo que no habrá restricciones y se analizan las condiciones necesarias para que cada actividad pueda ser ejecutada cumpliendo el cronograma del plan maestro.

Look ahead: En nuestro caso establecemos una ventana de tiempo de 3 semanas vista en la secuencia de actividades, motivada por la interacción de las distintas contratistas trabajando conjuntamente en obra. El cumplimiento del mismo se revisa semanalmente en visita de obra, con el objetivo de que los responsables de cada tarea y últimos planificadores, evalúen el grado de avance de la anterior semana, y se comprometan a la consecución del mismo.

3.2.3 Descripción de la secuencia de fases y tareas

La guía de la dirección de obra, desarrolla la secuencia de actividades reales en obra implementando a su vez la metodología Lean-LPS (Tabla 2).

FASE 1. PARTIDAS LIGADAS A LA PARCELA

1.1 Acondicionamiento del terreno: desde el desbroce y limpieza del terreno, excavación hasta la cota resistente y excavación de zanjas para el paso de instalaciones.

1.2 Cimentación: Habitualmente, se ejecutará una solera ventilada, de hormigón armado sobre encofrado perdido de módulos de polipropileno tipo “caviti” y viga de borde de 30x50cm. Incluyendo ventilación de solera, mediante tubos de PVC 110mm y remate en T. El espesor de la solera, así como su armado dependerá de las condiciones del terreno, siendo la más habitual de un canto de 25+5.

1.3 Instalaciones generales de parcela y red de saneamiento horizontal

FASE 2. ESTRUCTURA

2.1 Replanteo de perfiles de cimentación sobre la solera ventilada.

Hito 1. Comprobación replanteo de perfiles de cimentación.

Tabla 2. Secuencia de fases de ejecución y parámetros de planificación LPS definidos por los responsables.

Fases	Plazo	Subcontratas y operarios en obra	Fase precedente	Restricción para comenzar	Puntos críticos de especial atención
Fase 1. Partidas ligadas a la parcela	3 semanas	Obra civil (3 operarios)	Proyecto de ejecución	No disponer de suministros provisionales; abastecimiento de agua e instalación eléctrica	Nivelación de la solera, se intentará la máxima horizontalidad. Área de la solera, se dejará una holgura 2 cm.
Fase 2. Estructura	3 semanas	Montaje de estructura (4 operarios).	Partidas ligadas a la parcela	Falta de suministro de la estructura de aluminio y madera en obra.	Sellados con junta molecular en puntos susceptibles de la estructura. Colocación de lámina impermeable en la unión de estructura de madera con el aluminio
Fase 3. Envoltente Hermética	4 semanas	Carpintería de madera y Carpintería exterior (6 operarios)	Estructura	Mala ejecución de sellados en uniones, entre las Ls de cimentación y solera. Falta de colocación de tyvek en encuentros singulares.	Puntos especiales hermeticidad
Fase 4. Pre-instalaciones	2 semanas	Tabiquería seca e Instalaciones (6 operarios)	Envoltente Hermética	Falta de hermeticidad	Cruces entre conductos de climatización y ventilación. Correcta ubicación del retorno de recuperador en la impulsión del clima.
Fase 5. Tabiquería y aislamientos	4 semanas	Tabiquería seca e Instalaciones (7 operarios)	Pre instalaciones	Aclarados pasos para instalaciones	Colocación de aislamiento en trasdosados de cubiertas inclinadas, barrera de vapor continua en pasos instalaciones.
Fase 6. Carpintería y Acabados	4 semanas	Tabiquería seca y Carpintería (6 operarios)	Tabiquería y aislamientos	Placas de yeso laminado instaladas	Coordinación entre oficios; pastado y lijado de placas de yeso, a la par de colocación de guarniciones de puertas de paso, y pavimentos.
Fase 7. Urbanización	4 semanas	Obra civil y carpintería (6 operarios)	Carpintería	Obra recogida	Drenaje perimetral

2.2 Instalación Ls de cimentación, marcos estructurales y pilares madera: Se atornillarán a la cimentación mediante varillas roscadas. El apoyo de los pilares será sobre Ls, además se protegerán los pies de pilares de madera mediante lámina impermeable.

2.3 Cerramiento de fachada panel Walluminium: Colocación de los paneles de cerramiento de fachada, previa instalación de las juntas elásticas EPDM espumado y autoadhesivo, garantizando que las uniones entre los paneles sean coplanarias.

2.4 Forjado Planta Alta: Instalación previa de las vigas de madera laminada, para proceder con la colocación de vigas de forjado OSB HB97 300 con intereje 0,60m. El forjado consta de las vigas de madera OSB y tableros superiores de 22 mm e inferiores de 15 mm, atornillados y pegados mediante adhesivo estructural formando un cajón indeformable. El mismo tiene carácter estructural, funcionando como un diafragma y dotando de rigidez al conjunto.

2.5 Marcos estructurales de la planta alta: Impermeabilizando la unión horizontal entre marcos de planta baja y planta alta

2.6 Cubierta panel Walluminium: Nos servimos del forjado para la colocación de los paneles de cubierta. Estos paneles siempre sobresaldrán sobre los paneles de cerramiento entre 1 y 2 cm (permitiendo la evacuación de los canales).

2.7 Marcos estéticos: En fachadas transversales, formado por marco rígido de aluminio de sección 200x80x6.

2.8 Colocación de los remates de cubierta: Siendo piezas de chapa plegada en L de 2 mm separada unos 2 cm del cerramiento de paneles, selladas con membrana autoadhesiva Effisus. A mayores se incluirá cinta de EPDM espumado a modo de goterón que evitará que el agua ascienda.

Hito 2 Estructura: objetivo principal confirmar la correcta ejecución de la estructura. Estructura bien enlazada, juntas coplanarias entre paneles y verificación de puntos singulares a estanquidad. Comprobando los sellados en las uniones (ls-solera), (marcos-solera), (marcos a 45°), (marco PB y PA).

FASE 3. ENVOLVENTE HERMÉTICA

3.1 Fachadas hastiales: Fabricación en taller de los paneles opacos autoportantes de fachada, mediante cercos de madera tratada en autoclave arriostrosados con tablero de OSB en sus dos caras y rellenos de 10 cm de aislamiento de lana de roca. Colocación en obra de los opacos atornillados entre los marcos estructurales. A continuación, se dispondrá en su cara exterior de lámina impermeable con solape según caída de las aguas que envolverán totalmente la parte exterior y las esquinas de los paneles de madera.

3.2 Carpinterías exteriores: Se colocan directamente, atornilladas y selladas a los marcos estructurales diseñados para quedar vistos. Y solapando y sujetando la lámina impermeable contra los paneles autoportantes.

3.3 Trasdosados hermeticidad: Primeramente, trasdosado de cubierta y posteriormente trasdosado de cerramiento. Se colocará lámina impermeable – transpirable con cinta doble cara, siempre solapando según la caída de las aguas y descolgando por fachadas al menos 10 cm. A continuación, se

colocan los tableros de OSB de la cubierta atornillándolos en las alas de los paneles y se presta especial atención en no perforar la lámina en la cámara ventilada. Y sellándose entre sí.

3.4 Forjados: Sobre solera de planta baja, estará formado por lámina plástica anti capilaridad (film de polietileno de 0,05mm) que se llevará hasta la altura de las carpinterías, sobre la que se dispondrá un doble rastrelado de madera de pino de 80x40 cm (opcional taco de madera tratada y rastrel) panel rígido de poliestireno extruido de espesor 16cm, y acabado superior de tablero de OSB3-22mm. Siendo el alto total de 20 cm.

Hito 3 Hermeticidad. objetivo garantizar la continuidad de una capa hermética alrededor de todo el volumen calefactado. (Procede aclarar que no se trata del ensayo bloower door exigido por el estándar passivhaus. Sino que se realiza una comprobación visual, que garantice la hermeticidad de las juntas de la envolvente.)

FASE 4. PRE INSTALACIONES

4.1 Montaje subestructura de placas de yeso laminado. Se prestará especial atención a las cotas interiores de las estancias ya que de ello depende en muchos casos el cumplimiento de la normativa de habitabilidad. Importante descontar los espesores de los materiales de revestimiento de los tabiques.

4.2 Pre Instalaciones: Se replantean las instalaciones en concreto el correcto trazado de los conductos de climatización y ventilación, nos aprovecharemos del paso entre las vigas de forjado HB97 300 en sentido longitudinal y teniendo especial precaución siguiendo las indicaciones del fabricante si tenemos la necesidad de atravesar las mismas en sentido perpendicular.

Hito 4 Replanteo instalaciones: objetivo principal es el correcto trazado de conductos, salidas de ventilación y ubicación de los equipos, acordes a la arquitectura y a las singularidades del sistema constructivo de la edificación

FASE 5 TABIQUERÍA Y AISLAMIENTOS

5.1 Trasdosados aislamientos y barrera de vapor: Se instalarán los aislamientos de los trasdosados de cubiertas y cerramientos compuestos por; una primera capa de lana de roca de 100mm de espesor y una segunda capa de 65mm y barrera de vapor por la cara caliente del aislamiento rematando bien sus juntas con cinta y encuentros con instalaciones.

Hito 5 Aislamiento y Barrera de vapor: objetivo principal es la ausencia de puentes térmicos, y garantizar los espesores de aislamiento descritos en proyecto, con ayuda de la cámara termográfica para la detección de puntos fríos, y/o posibles puentes térmicos. Colocación de la BV por la cara caliente del aislamiento garantizando la continuidad de la misma.

5.2 Colocación acabado placa de yeso: Se procede con el pastado y lijado de las placas de yeso, seguido de las primeras manos de pintura

FASE 6. CARPINTERÍA

6.1 Pavimentos y rodapiés: Se procede con la instalación pavimento laminado tarima flotante sobre lámina de espuma de polietileno de alta densidad de 3 mm de espesor.

6.2 Puertas de paso y mobiliario de obra: Los armarios se pre-fabricarán en taller y se instalarán en obra.

6.3 Instalación del acabado final de fachada hastial

Hito 6 Prueba de instalaciones y revisión acabados interiores; objetivo principal es la puesta en marcha y verificación del correcto funcionamiento de todas las instalaciones. A mayores, se realiza la revisión de los acabados interiores, se fija el cumplimiento de los criterios de aceptación o rechazo, y se define el listado de puntos a solventar en un plazo fijo

FASE 1



Figura 3. Cimentación armados.



Figura 4. Cimentación solera ventilada.



Figura 5. Replanteo marcos estruct.

FASE 2



Figura 6. Montaje marcos estruct. PB.



Figura 7. Montaje marcos PB y muros.



Figura 8. Estructura y cubierta completas.

FASE 3



Figura 9. Colocación lámina impermeable en fachada hastial.



Figura 10. Forjado PB.



Figura 11. Trasdosados hermeticidad.

FASE 4



Figura 12. Replanteo instalaciones de fontanería electricidad y teleco.



Figura 13. Replanteo conductos de climatización y ventilación.



Figura 14. Instalación eléctrica.

FASE 7. URBANIZACIÓN

7.1 Pavimentos exteriores, cierres de parcela y equipamiento exterior

Hito 7 Acabados Exteriores: Pruebas instalaciones generales de parcela y verificación acabados exteriores

3.3. Aplicación del manual

Comprobación de los usos del manual en 3 obras concretas. Se muestran a continuación, la secuencia de imágenes (figu-

FASE 5



Figura 15. Lana de roca esp. 100 + 65 mm.

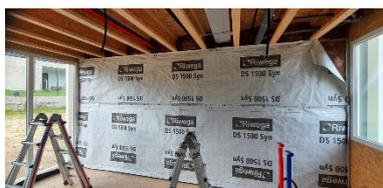


Figura 16. Barrera de vapor continua.



Figura 17. Colocación placas de yeso laminado.

FASE 6



Figura 18. Instalación de la escalera.



Figura 19. Instalación pavimento laminado sobre lámina de espuma de polietileno.



Figura 20. Instalación acabado de fachada.

FASE 7



Figura 21. Porriño MFR. Acabado exterior.



Figura 22. Boiro CSH. Acabado exterior.



Figura 23. Cangas MMG. Acabado exterior.

ras 3 a la 23) de cada una de las fases que definen la puesta en obra de las mismas.

Identificación de nuevos errores detectados:

Fase 2:

- No dejar holgura de 20mm entre las vigas de OSB el cerramiento para disponer la lámina impermeable-transpirable y el tablero de trasdosado de cerramiento de OSB de 15.
- Falta de impermeabilización en la junta horizontal entre marcos de PA y PB.
- Ausencia de junta de EPDM en la unión entre los marcos de PA y el panel de cubierta.
- Paneles de cubierta sin sobresalir sobre los paneles de cerramiento entre 1 y 2 cm (para permitir la correcta evacuación de los canales).
- Remate de cornisa, sin separación de la chapa L 20 mm no permitiendo la evacuación de los canales, falta de colocación o colocación en lado incorrecto de la cinta de EPDM espumado.

Fase 3:

- Colocación de la lámina impermeable en el trasdosado de cubierta con el solape en sentido contrario al sentido de evacuación a la caída de las aguas.

- Colocación de lámina impermeable por su cara inversa, es decir la cara impermeable no en contacto con la posible agua de condensación.
- No verificación de la cámara ventilada del cerramiento de panel Walluminium (tierra cota más alta que la solera de cimentación)
- No colocación de chapas en remates de cubiertas con el producto apropiado de sellado molecular (effisus), sino que atornilladas, generando problemas de entrada de agua
- Colocación de lámina impermeable generando pliegues en las cornisas. (Problema sobretodo en cubiertas con ptes bajas)

Fase 4:

- No dejar los puntos de iluminación correctamente situados según indicaciones en los planos
- Ídem fontanería, en concreto falta de coordinación entre subcontratas de instalaciones y cocinas
- No dejar previsión de grifería empotrada en duchas.
- Caudales de clima no ajustados, ni homogéneos en todas las estancias

Fase 5:

- Montaje de subestructura de pladur, sin tener en cuenta las cotas interiores de las estancias, sin descontar los espe-

sores de los materiales de revestimientos. Incumpliendo en ciertos casos la normativa de habitabilidad.

- No instalación de refuerzos en la subestructura de pladur, donde están proyectados; lavabos suspendidos, tomas de TV y muebles altos de cocinas.

Fase 6:

- Colocación de tableros de madera cemento en la zona de agua, de espesor superior al que se necesita (más de 8mm) generado juntas grandes, muy visibles.
- Puertas de paso, sin holgura de 15 mm impidiendo la circulación del aire de retorno bajo las mismas.

3.4. Optimización del manual de dirección de obra

Se corrigen los errores detectados durante la aplicación del manual, se define un nuevo listado de restricciones, sobre el que se trabaja conjuntamente, para disponer de las soluciones consensuadas con antelación. Así como, se establecen partidas que se pueden optimizar con un mayor grado de industrialización en taller. Y se generan los check list de comprobación de hitos, para seguir un exhaustivo registro de las partidas y puntos singulares a verificar.

Procede aclarar que cada hito, no es un hito de cumplimiento de tiempo, sino de comprobación y verificación de los indicadores de calidad y sostenibilidad, y a su vez su cumplimiento, establece un eje común transversal sobre los parámetros tiempo y coste.

Calidad de la construcción; asegurando el cumplimiento de las características particulares del sistema constructivo. Se determina más concretamente con la verificación de los hitos:

Replanteo de perfiles de cimentación, Estructura y Replanteo de instalaciones.

Sostenibilidad de la edificación, cumplimiento de los requisitos de una edificación pasiva, y se determina más concretamente con la verificación de los hitos: Hermeticidad, Aislamiento y BV y Prueba de instalaciones.

Tiempo y coste. En el cumplimiento de todos los hitos existe una relación directa, con los parámetros de tiempo y coste, sin desvíos en obra. Puesto que la corrección de partidas en cualquiera de los anteriores implicaría un desvío en el plazo y en el presupuesto total de la obra.

Cabe señalar, que otro de los factores importante en beneficio de la productividad, es el trabajar regularmente con las mismas subcontratas, optimizando la planificación y la consecución de los hitos de verificación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de la aplicación del método optimizado de dirección de obra, es la consecución de la mejora continua de las obras, y por consiguiente del manual, que se retroalimenta de la experiencia real adquirida en cada puesta en obra.

Gracias a la guía, se ha garantizado la mejora de la productividad y eficiencia durante la etapa de ejecución de las edificaciones modulares pasivas. En concreto, los resultados

porcentuales en la mejora de la productividad han sido calculados respecto a los datos previos a la construcción de viviendas modulares de similar envergadura sin seguir este método de dirección de obra.

Parámetro tiempo: Se constata tal y como le sucedió a Del Solar et al., 2021 (24) que, el trabajar la planificación con todos los integrantes del equipo, conlleva un gran resultado, consiguiendo finalizar la ejecución de las obras con antelación al calendario fijado inicialmente. Lo que supuso, una reducción de plazo en un 26 %. Pasando de un plazo de ejecución de 6 meses a 5 meses y 2 semanas. No obstante, cabe señalar que se tuvieron en cuenta estimaciones de tiempo incorrectas en la planificación de fases inicial, motivadas por el desconocimiento de los subcontratistas en llevar a cabo la ejecución de algunas partidas por falta de experiencias previas, y por lo tanto surgieron desvíos en la duración de la fase a la que pertenecían. Al igual que explica en su investigación Del Solar et al., 2021 (24) siendo destacable, que, gracias a un mayor grado de industrialización, conseguimos subsanar y mejorar otros plazos, eliminando el desvío total sobre el cronograma y alcance del plan maestro.

Parámetro coste: Se ha alcanzado una mejoría del 16% respecto a los desvíos de presupuesto, valor similar al porcentaje promedio que destacan en la literatura Zimina et al., 2021 (40). Constatamos que, la incorporación de la metodología productiva ha garantizado costes más competitivos, tal y como indica Hernando Castro, 2013 (41). Así como consideramos de gran ayuda, para abaratar costes, la utilización de herramientas específicas de simulación e información Building information modeling durante la redacción del proyecto, con un alto nivel de definición facilitando en gran medida la comprensión de todos los agentes involucrados, y mejorado la aplicación del método de dirección de obra. Que junto a la metodología LPS, tal y como destacan las publicaciones de referencia (14, 41), favorecieron a su vez el cumplimiento de los hitos y entregas.

Parámetro calidad: Destacamos una mejora considerable en la calidad de la ejecución, sin necesidad de rehacer o subsanar partidas, respecto a las construcciones modulares pasivas construidas con anterioridad a la aplicación del método de dirección de obra. Disminuyendo en un 80% los errores recurrentes. Así que, como definió Koskela, 2000 (20) con la aplicación de los principios base de Lean Construction conseguimos mejorar la productividad y la eficiencia de la construcción, y por lo tanto, aumentar la calidad final, tal y como ha sucedido en nuestros casos reales con la aplicación del método de dirección de obra. No obstante, es legítimo comentar, que ha surgido alguna nueva incidencia, debido a recientes singularidades en los encuentros constructivos, derivadas de la flexibilidad del sistema.

Se ha conseguido la mejora continua del proceso de construcción, conllevando a una mejora de competitividad dentro de nuestro sector, en lo que coincidimos con la revisión de literatura de Hernando Castro, 2013 (41), que explica que la implantación de metodología Lean en el proceso productivo de diferentes industrias, constata una mejora continua del proceso que promueve la competitividad y productividad. Tal y como concluyeron Kunz & Fischer, 2020, (42) la integración de diversos métodos en un mismo proyecto y obra, dotan de un valor añadido, muy superior a su uso por

separado en la práctica de la industria de la Arquitectura-Ingeniería-Construcción (AEC). En nuestro caso, añadimos los criterios de la arquitectura pasiva, y un elevado nivel de prefabricación de calidad. Formulando un método integrado revolucionario, que dota, por consecuencia de un valor añadido el proceso de construcción, en el que se atiende simultáneamente a; exigentes requisitos de sostenibilidad, metodología Lean-LPS, y un alto grado de industrialización.

Parámetro sostenibilidad: El uso del método ofrece claros resultados, garantizando el cumplimiento del estándar *passivhaus* (26, 27) gracias a una correcta puesta en obra, proporcionando una evidencia clara, de forma similar que en la investigación de R. Mitchell y S. Natarajan, 2020 (29) donde el cumplimiento del estándar ofrece hogares de bajo consumo de energía, sin brecha de rendimiento, que son asequibles para calentar sin la necesidad de métricas complejas. En nuestro caso concreto, se identificó una brecha de rendimiento de desviación mínima entre las medidas de “como se diseñó” a “cómo se construyó”, tal y como concluyeron en sus estudios Moreno-Rangel, 2020 (43). A su vez, los ensayos determinaron, que se logra una bajada considerablemente de la demanda energética, aumentando a su vez, la temperatura superficial interior de la envolvente, en especial de las ventanas, al igual que sucede en el estudio de Hatt et al., 2012 (44). Y coincidimos con Bruscatto et al., 2011 (45), en el logro de un proceso de diseño integrado, “estrategia que pretende promover una arquitectura más sustentable a través de la colaboración multidisciplinaria temprana”. En la aplicación de nuestro método, para alcanzar un mejor desempeño ambiental del edificio, ha destacado la importancia de la coordinación del trabajo y el equilibrio de intereses del equipo.

5. CONCLUSIONES

La novedad del estudio reside en la creación de un nuevo método de dirección de obra para construcciones modulares pasivas organizado y viable, que se fundamenta en la mejora de la productividad a través de la eficiencia de la puesta en obra. La aplicación del manual se ha limitado a obras de tipología unifamiliar exenta en clima cálido templado, ejecutadas con sistema constructivo modular ligero. Para ello se han utilizado 3 muestras representativas localizadas en las Rías Baixas

con un radio de acción de 50 km.

En concreto, se ha demostrado que con el cumplimiento los 7 hitos fijados a lo largo de la ejecución y a su vez la aprobación de los check list de cada hito por la dirección facultativa, garantizan la mejora de los indicadores de productividad, “plazo, coste, calidad y sostenibilidad” respecto a la ejecución de viviendas sin la aplicación de este método.

Se confirma que la guía de dirección de obra para viviendas modulares y ecoeficientes, no es el resultado de la aplicación de la metodología Lean, sino que es la creación de un método adaptado las características específicas de las CML pasivas y más concretamente a las particularidades sistema constructivo industrializado e innovador objeto de esta investigación.

Tal y como explicábamos en la introducción de este artículo, confirmamos que con la aplicación del método cumplimos los nuevos estándares de eficiencia energética establecidos por la Unión Europea, Near Zero Energy Building (nZEB) (12, 13). Creando viviendas de consumo energético casi nulo, con un excelente comportamiento ambiental y baja demanda de energía.

Se constata una mejoría clara en el grado de industrialización, adelantando la producción de las partidas en taller de los elementos en serie, y optimizando las partidas al máximo para su posterior ensamblaje. Ayudando a mejorar la calidad, y estableciendo un ahorro muy significativo del plazo. Todo ello produciendo tan pocos residuos como nos es posible, estimando en menos de un 15% los desperdicios respecto a la construcción convencional (39).

Futuras líneas de investigación: método para la dirección de obra en otras ubicaciones de la geografía nacional, ejecutadas con un sistema constructivo modular ligero con certificación *Passivhaus* para clima templado (46).

AGRADECIMIENTOS:

Queremos agradecer al Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) su apoyo.

REFERENCIAS

- (1) Lim, Y. W., Ling, P. C., Tan, C. S., Chong, H. Y., & Thurairajah, A. (2022). Planning and coordination of modular construction. *Automation in Construction*, 141, 104455. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104455>.
- (2) Roque, E., Oliveira, R., Almeida, R. M., Vicente, R., & Figueiredo, A. (2020). Lightweight and prefabricated construction as a path to energy efficient buildings: Thermal design and execution challenges. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 19(1), 1-32. <https://doi.org/10.1504/IJESD.2020.105465>.
- (3) Badir, Y. F., Kadir, M. A., & Hashim, A. H. (2002). Industrialized building systems construction in Malaysia. *Journal of architectural engineering*, 8(1), 19-23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2002\)8:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2002)8:1(19)).
- (4) Kasperzyk, C., Kim, M. K., & Brilakis, I. (2017). Automated re-prefabrication system for buildings using robotics. *Automation in Construction*, 83, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.002>.
- (5) Röck, M., Ruschi Mendes Saade, M., Balouktsi, M., Nygaard, F., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G. and Lützkendorf, T. (2019). Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Appl. Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.
- (6) Agudelo, H. A., Hernández, A. V., & Cardona, D. A. R. (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y ambiente*, 15(1), 105-117.
- (7) Waisman, H., De Coninck, H., & Rogelj, J. (2019). Key technological enablers for ambitious climate goals: Insights from the IPCC special report on global warming of 1.5 C. *Environmental Research Letters*, 14(11), 111001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4cob>.

- (8) Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74-94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>.
- (9) Horizon, E. C. (2020). URL: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020>.
- (10) Europeo, P. (2002). *Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la Eficiencia Energética de los Edificios*. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- (11) Europeo, P. (2010). *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios*.
- (12) Mohamed, A., Hasan, A., & Sirén, K. (2014). Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives. *Applied Energy*, 114, 385-399. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.065>.
- (13) Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marengo, L. (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge-The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>
- (14) Uriz, A. L., Sanz, C., & Sánchez, B. (2019). Aplicación de un modelo Lean-BIM para la mejora de la productividad en redacción de proyectos de edificación. *Informes de la Construcción*, 71(556), e313. <https://doi.org/10.3989/ic.67222>.
- (15) Heigermoser, D., de Soto, B. G., Abbott, E. L. S., & Chua, D. K. H. (2019). BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management. *Automation in Construction*, 104, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.019>.
- (16) Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Vol. 72, p. 39). Stanford: Stanford university.
- (17) Ballard, G., & Howell, G. (1994). Implementing lean construction: stabilizing work flow. *Lean construction*, 2, 105-114.
- (18) Hamzeh, F. R., Ballard, G., & Tommelein, I. D. (2008, July). Improving construction workflow-the connective role of lookahead planning. In *Proceedings for the 16th annual conference of the International Group for Lean Construction* (pp. 635-646). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3804.3685>.
- (19) Hoyos, M. F., & Botero, L. F. (2018). Evolution and global impact of the Last Planner System: a literature review. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 187-214. <https://doi.org/10.14482/inde.36.1.10946>.
- (20) Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- (21) V. Porwal, J. Fernández-Solis, S. Lavy, & Z. K. Rybkowski, (2010). Last planner system implementation challenges, *Production Planning and Control*, p. 10.
- (22) Fernandez-Solis, J. L., Porwal, V., Lavy, S., Shafaat, A., Rybkowski, Z. K., Son, K., & Lagoo, N. (2013). Survey of motivations, benefits, and implementation challenges of last planner system users. *Journal of construction engineering and management*, 139(4), 354-360. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000606](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000606).
- (23) Kalsaas, B. T. (2012). The Last Planner System Style of Planning: Its Basis in Learning Theory. *Journal of Engineering, Project & Production Management*, 2(2).
- (24) del Solar, P., del Rio, M., Fuente, R., & Esteban, C. (2021). Herramientas de trabajo colaborativo en el sector de la construcción español. Buenas prácticas para la implementación de la metodología "Último Planificador (LPS)". *Informes de la Construcción*, 73(561), e383. <https://doi.org/10.3989/ic.77475>.
- (25) Pons Achell, J. F., & Rubio Pérez, I. (2019). Lean Construction y la planificación colaborativa. Metodología del Last Planner® System. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE).
- (26) Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V., & Haas, A. (2005). Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and buildings*, 37(11), 1186-1203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.020>.
- (27) Gantioler, G. (2010). Manual para la certificación "Estándar Passivhaus" CERTIFICADO Estándar Passivhaus Dr. Wolfgang Feist. Versión del, 23.
- (28) Linhares, P., Hermo, V., & Meire, C. (2021). Environmental design guidelines for residential NZEBs with liner tray construction. *Journal of Building Engineering*, 42, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102580>.
- (29) Mitchell, R., & Natarajan, S. (2020). UK Passivhaus and the energy performance gap. *Energy and Buildings*, 224, 110240. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110240>
- (30) De Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in construction*, 41, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- (31) Hermo, V. (2011). Sistema constructivo industrializado in situ COTaCERO: transferencia tecnológica: construcción de depósitos-ejecución de viviendas en altura mediante paneles portantes de acero.
- (32) Valcárcel, J. P., Hermo, V., & Cheda, J. B. R. (2013). Un nuevo sistema constructivo: Aspectos estructurales del sistema COTaCERO: J. P. Valcárcel, V. Hermo, J. B. Rodríguez Cheda. En *Estructuras y Arquitectura* (pp. 1097-1104). Prensa CRC. <https://doi.org/10.1201/b15267-149>.
- (33) Rodríguez Cheda, J. B., Pérez-Valcárcel, J., & Hermo, V. (2011). Método para construir edificaciones de varias plantas mediante paneles portantes ligeros desde el nivel del terreno. *Spanish Patent*, 2370438.
- (34) Pérez-Valcárcel, J., Muñoz-Vidal, M., & Hermo, V. (2020). Construcción izada: Condicionantes estructurales del sistema REVERSTOP. *Informes de la Construcción*, 72(559), e355-e355. <https://doi.org/10.3989/ic.72993>.
- (35) Hermo, (2015). Estructura modular para la construcción de edificaciones, Spanish patent., ES 2 716 889 B2 OE PM 2015, n.d.
- (36) Pons Achell, J. F. (2014). Introducción a lean Construction Fundación Laboral de la Construcción (Ed.) (pp. 74). Retrieved from <http://www.fundacionlaboral.org/documento/introduccion-al-lean-construction>.

- (37) Hastak, M. (1998). Advanced automation or conventional construction process? *Automation in construction*, 7(4), 299-314. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(98\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(98)00047-8).
- (38) Qi, B., Razkenari, M., Costin, A., Kibert, C., & Fu, M. (2021). A systematic review of emerging technologies in industrialized construction. *Journal of building engineering*, 39, 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102265>.
- (39) Begum, R. A., Satari, S. K., & Pereira, J. J. (2010). Waste generation and recycling: Comparison of conventional and industrialized building systems. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(4), 383. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.383.388>.
- (40) Zimina, D., Ballard, G., & Pasquire, C. (2012). Target value design: using collaboration and a lean approach to reduce construction cost. *Construction management and economics*, 30(5), 383-398. <https://doi.org/10.1080/01446193.2012.676658>.
- (41) Hernando Castro, S. M. (2013). *Transferencia e integración de metodología industrial innovadora en la producción de viviendas* (Doctoral dissertation, Arquitectura). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.19878>.
- (42) Fischer, M., & Drogemuller, R. (2009). Virtual design and construction. In *Technology, design and process innovation in the built environment* (pp. 319-344). Spon Press. <https://doi.org/10.1080/01446193.2020.1714068>
- (43) Moreno-Rangel, A. (2020). Passivhaus. *Encyclopedia*, 1(1), 20-29. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1010005>.
- (44) Hatt, T., Saelzer, G., Hempel, R., & Gerber, A. (2012). High indoor comfort and very low energy consumption through the implementation of the Passive House standard in. *Revista de la Construcción*, 12(22-2012).
- (45) Bruscato, U. M., Alvarado, R. G., Oyola, O. E., Kelly, M. T., & Damico, F. C. (2011). Diseño integrado para viviendas energéticamente eficientes en Chile: Enhebrando capacidades. *Hábitat Sustentable*, 2-13.
- (46) Yakimchuk, T., Linhares, P., & Hermo, V. (2023). Evaluation of a modular construction system in accordance with the Passivhaus standard for components. *Journal of Building Engineering*, 76, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107234>.