



# ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD

L. Rodríguez<sup>1</sup>, J.M.González<sup>2</sup>, O. París<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Académica Departamento de Organización del Espacio, UCA, El Salvador. E-mail: lrrodriguez@uca.edu.sv

<sup>2</sup>Tutor del trabajo. <sup>3</sup>Co-tutor del trabajo. Ambos, PhD académicos del Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, UPC España.

**Resumen** – Evitar los impactos ambientales en el sector de la construcción es uno de los retos planteados en las agendas de gobernanza. Para ampliar un poco más esta óptica de evaluación de escenarios, se presenta el resultado del trabajo de fin de máster desarrollado en tres fases: 1) Investigación, 2) Desarrollo y 3) Análisis. El resultado de este proceso se resume así: Antecedente cronológico de la construcción industrializada, casos de estudio, desarrollo de edificio que se denomina edificio “X” tomando atributos de los casos de estudio analizados. Así mismo, se desarrolla la modulación y cálculo de predimensionado para tres tipologías estructurales; pórticos, muros y módulos 3D, tomando en cuenta 3 sistemas constructivos; hormigón, acero y madera, que dan como resultado 7 versiones de edificio “X”. Finalmente se presenta el cálculo de impacto ambiental equivalente a la energía y CO2 incorporados por fabricación y transporte de los siete edificios. Se establecen parámetros conceptuales y medibles para visualizar el potencial para evitar impactos.

**Palabras Clave** – Construcción industrializada, sistemas estructurales, energía incorporada, CO2 incorporado.

**Abstract** – Avoiding environmental impacts in the construction sector is one of the challenges posed in governance agendas. To broaden this scenario evaluation optics a little more, the result of the master's final project developed in three phases is presented: 1) Research, 2) Development and 3) Analysis. The result of this process is summarized: Chronological history of industrialized construction, case studies, building development called “X” building, taking attributes of the case studies analyzed. Likewise, the modulation and calculation of predimensioning for three structural typologies is developed; frames, structural walls and 3D modules, taking into account 3 construction systems; concrete, steel and wood, which result in 7 versions of “X” building. Finally, the calculation of the environmental impact equivalent to the embodied energy and emissions CO2 by manufacturing and transport of the seven buildings is presented. Conceptual and measurable parameters are established to visualize the potential to avoid impact.

**Keywords** – Industrialized building trade, structural system, embodied carbon, embodied energy.

## I. INTRODUCCIÓN

Evitar los impactos ambientales en el sector de la construcción es uno de los retos planteados en las agendas de gobernanza, esto se refleja en leyes, reglamentos, códigos, normas y manuales. El evento detonante de este fenómeno global ha sido el Protocolo de Kyoto en el que las naciones se comprometieron a reducir las emisiones de

gases de efecto invernadero, a través de estrategias enfocadas a combatir las causas de emisiones, dos de estas causas que contribuyen al cambio climático están vinculadas a las edificaciones, una es la generación de residuos y la otra es el uso de recursos no renovables y quema de combustibles fósiles [1] [2].

El paso más importante que las naciones han dado es generar instrucciones y mandatos de obligatorio cumplimiento para la evaluación y desarrollo de proyectos de edificación en todas sus etapas; planificación, diseño, construcción, rehabilitación y desmontaje. En este sentido es un deber para el proyectista contabilizar las potenciales emisiones y evaluar escenarios en las etapas del proyecto. Para este fin, se han creado herramientas y bases de datos que ayudan a los profesionales vinculados al sector de la edificación a generar mejores alternativas de desarrollo y a ser conscientes del impacto que generan sus decisiones de diseño, así mismo, la industria tiene el deber de incorporar información sobre las emisiones de sus procesos productivos en la certificación de sus productos.

Para ampliar esta óptica, el presente trabajo tiene como objetivo obtener los resultados de los impactos ambientales caracterizados en 2 factores considerados relevantes en construcción: Energía Contenida y CO2 equivalente, incorporados en la fabricación y transporte de siete modelos de construcción industrializada. Para establecer una metodología que sienta bases atendiendo a la exigencia de la normativa española. Otros objetivos específicos son:

1. Identificar los impactos ambientales y contrastar los impactos con las prestaciones de cada sistema constructivo industrializado.
2. Desarrollar herramientas de análisis comparativo entre sistemas constructivos para verificar la relación entre impactos ambientales y las consecuencias de la selección de un determinado sistema constructivo y estructural.
3. Verificar las adaptaciones que conlleva un proyecto arquitectónico según el sistema constructivo y estructural seleccionado.
4. Reseñar cronológicamente el ámbito de la construcción industrializada.
5. Sentar las bases para futura investigación.

## II. METODOLOGÍA

Se aborda una compleja y multivariable temática desde tres puntos de vista:

- Construcción y prefabricación industrializada
- Desarrollo estructural
- Parámetros de sostenibilidad

Para construir el hilo conductor entre las tres temáticas se formula la pregunta investigativa: ¿Cuál es el elemento vinculante entre las temáticas construcción, estructura y sostenibilidad? Para responder a esta pregunta se ha desarrollado un esquema metodológico como se muestra en la Fig. 1 que detalla las fases de trabajo y especifica que en cada fase se generan resultados que se constituyen en la base de la fase que precede:

### A. Fase I: Investigación

En la fase de investigación, se establece la relación entre sistemas estructurales según los sistemas constructivos, se han caracterizado y se ejemplifican a través de casos de estudio que han sido seleccionados por su ubicación geográfica en España como ejemplo insigne de aplicación de tecnologías constructivas de prefabricación industrializada.

### B. Fase II: Desarrollo

Se desarrolla una propuesta de edificio con regularidad en planta y elevación como una visión de edificio tipológico al que se denomina edificio "X" tomando atributos de los casos de estudio analizados. Así mismo, se desarrolla la modulación y cálculo de predimensionado para tres tipologías estructurales tomando en cuenta 3 sistemas constructivos en hormigón, acero y madera que da como resultado 7 versiones de edificio "X", sin detallar los elementos de conexión, pero sí destacando el sistema resistente únicamente a carga gravitatoria y de esta forma confirmar el peso de los elementos, que constituye la base para el análisis.

### C. Fase III: Análisis

Se desarrolla el cálculo de impactos ambientales de Energía y CO2 equivalente, por fabricación y transporte de los siete edificios predimensionados, así mismo, se analizan los resultados de forma comparativa y se establecen parámetros conceptuales y medibles para medir el potencial de evitar impactos.

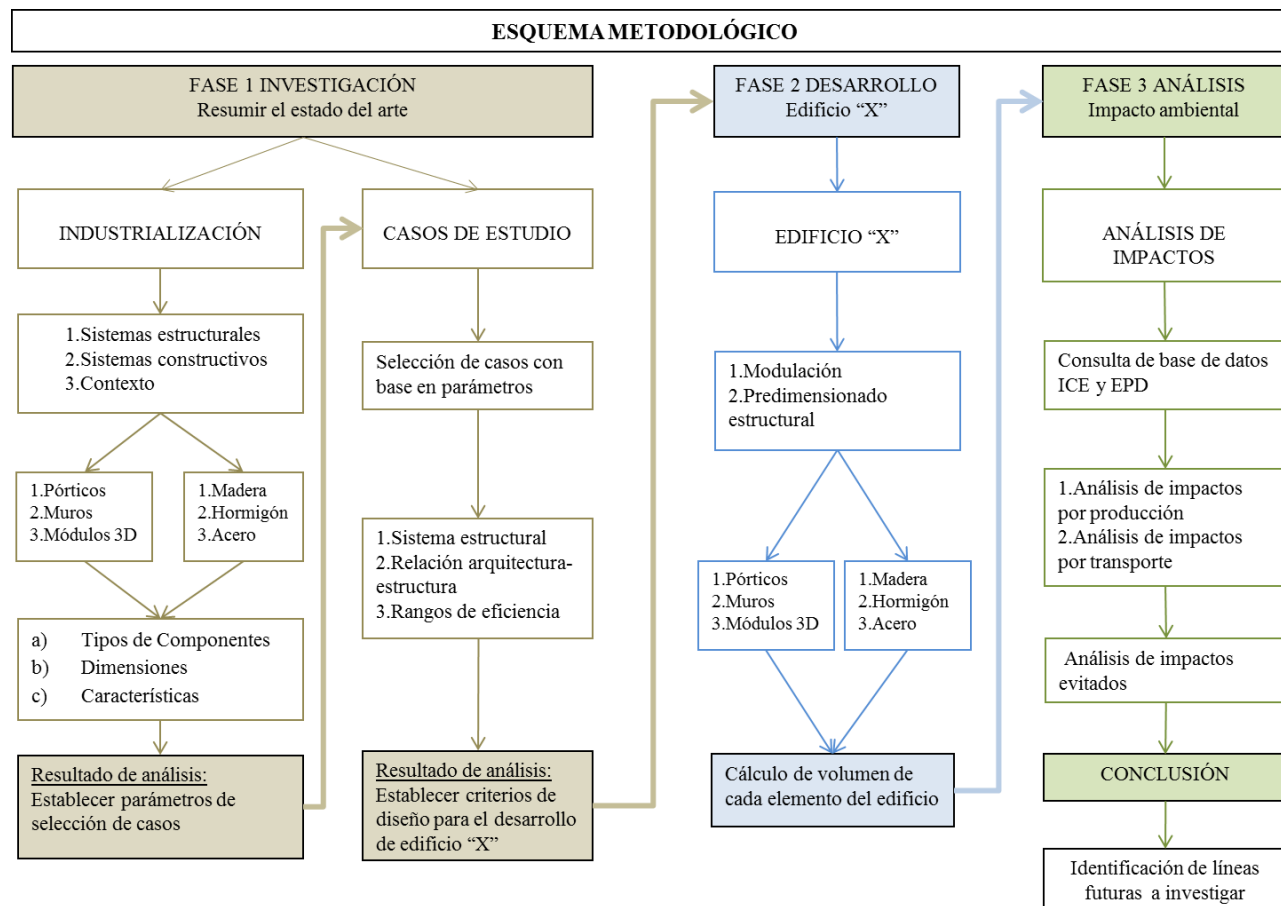


Fig. 1 Esquema Metodológico



### III. PROCESO

Posterior a la segunda guerra mundial, la reconstrucción de las ciudades demandó estrategias eficientes para la edificación de viviendas, una de estas fue la prefabricación industrializada, en este sentido, los sistemas constructivos industrializados pueden ser de tipo abierto o cerrado, ya sea en la totalidad del edificio o en alguno de los subsistemas. En el caso de los sistemas cerrados, cada elemento es coincidente con otro, provistos de compatibilidad entre sí. En contraste a éstos, los sistemas abiertos se caracterizan por ser estándar y brindan flexibilidad en el diseño, pero requieren de especial atención a las uniones [3] [4].

La tabla 1 muestra el universo tipológico de sistemas constructivos de prefabricación industrializada más comunes en Europa.

Tabla 1. Sistemas de prefabricación industrializada

Sistema estructural	Hormigón	Acero	Madera
Estructura de pórticos	Pórticos de hormigón prefabricado	Pórticos de acero laminado	Pórticos de madera laminada
Muros estructurales	Muros de hormigón prefabricado y fachadas portantes o semi-modulo portante	Paredes de carga arriostradas tipo Steel-frame	Paneles sólidos de CLT y Paredes de carga arriostradas tipo Ballon-frame
Módulos 3D autoportantes	Módulos 3D de hormigón prefabricado	Módulos 3D tipo esqueleto tipo Steel-frame	Módulos 3D de CLT y módulos 3D tipo esqueleto tipo Ballon-frame

Según la Asociación Técnica Española del Pretensado ATEP, todos los sistemas de construcción tienen sus propias características, tomando en cuenta sus facetas, el diseño, las consideraciones en altura, los detalles de unión y la estabilidad. Así mismo recomienda que las uniones entre elementos sean lo más sencillas posible y que el edificio en su conjunto sea analizado evitando hacerlo como si fuese un sistema convencional in situ, sin dejar de prestar atención a los motivos de posible falla local y a los elementos de estabilidad según las tipologías estructurales [5], ver tabla 2.

Tabla 2. Elementos estabilizadores según sistema estructural

Elemento estabilizador	Pórticos	Esqueleto	Muros portantes	Fachada portante	Módulos 3D
Columna en ménsula	x	x			
Conexiones resistentes a momentos	x				
Forjado como diafragma	x	x	x	x	
Arriostramientos	x	x			
Muros resistentes a esfuerzo cortante		x	x	x	
Núcleo central		x	x	x	
Bloques auto portantes					x

La selección de los sistemas constructivos tanto para la búsqueda de casos de estudio como para el desarrollo del edificio “X” se realizó con base en los siguientes criterios:

1. Fueron considerados al menos dos tipologías constructivas por cada sistema estructural (tabla 1).
2. Fueron seleccionadas tecnologías de prefabricación industrializada abierta.
3. Los componentes son fabricados a una distancia no mayor a los 1000 km de la ubicación referente, Barcelona, a excepción del caso 1 que se consideró por ser pionero en Latinoamérica.

Hay especial interés en los casos de estudio de 4 plantas, con el propósito de verificar la mínima existencia de elementos estabilizadores estructurales definidos en tabla 2.

Los casos de estudio analizados fueron:

1. Fachada Portante de Hormigón: Secretaría del Centro Administrativo de Bahía en Salvador de Bahía, Brasil (1973). Diseñado por João Filgueiras Lima, “Lelé”.
2. Pórticos de hormigón prefabricado: Complejo de 112 viviendas sociales en el Barrio “El Polvorín” en Barcelona, España (2005). Diseñado por Pich Architects.
3. Muros estructurales de madera CLT: La cooperativa de viviendas La Borda en recinto industrial de Can Batlló Barcelona, España (2018). Diseñado por Lacol Cooperativa de Arquitectos.
4. Módulos 3D de hormigón prefabricado: El edificio de 30 viviendas de protección oficial VPO dotacionales para jóvenes en Banyoles promovido por INCASOL en Girona, España (2017). Diseñado por Xavier Tragant y Miguel Morte.

El factor común en los 4 casos de estudio, ha sido la rapidez en la ejecución de obras, la regularidad en el diseño y que en ningún caso hubo necesidad de arriostramiento.

Se denominó edificio “X” al edificio base para el desarrollo estructural en 7 combinaciones de sistemas estructurales representativas de las tipologías mencionadas en la tabla 1 que suscribe un área de 25 m x 25 m y que potencialmente puede albergar entre 6 y 8 unidades habitacionales (viviendas) por planta con un solo núcleo de escaleras y elevador, de esta forma optimizar tanto las circulaciones verticales como las horizontales, sin contemplar la distribución en planta de las viviendas. La dimensión de 25 m responde a dividir esta cantidad entre 3, da como resultado 8,3 m que es separación óptima de los pórticos de hormigón prefabricado en el sentido perpendicular a la dirección de carga, tomando en cuenta que este sistema industrializado es el más común en el territorio Español.

Otro criterio de desarrollo del edificio “X” es la simetría en planta y la regularidad tanto vertical como horizontal. En esta misma línea se ha buscado distribuir los elementos resistentes verticales de forma simétrica con el objetivo que el centro geométrico coincida con el centro de rigidez, para evitar torsión, ver Figura 2 y tabla 3.

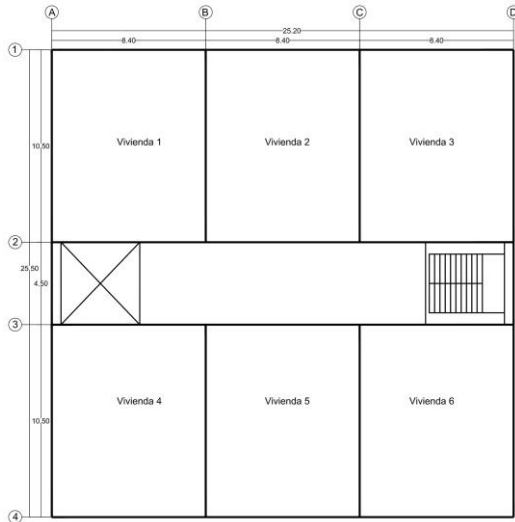


Fig. 2 Planta de edificio “X”

Tabla 3. Elementos del sistema estructural y envolvente

Sistema estructural	Edificio	Elemento resistente vertical	Elemento resistente horizontal	Losa	Fachada no portante
<b>PÓRTICOS</b>	1-P-H	Pilar hormigón prefabricado	Viga hormigón prefabricada	Placa alveolar	Fachada hormigón prefabricada
	2-P-A	Pilar acero HEB	Viga acero IPE	Chapa grecada	Fachada hormigón prefabricada
<b>MUROS</b>	3-M-H	Muro hormigón prefabricado		Placa alveolar	
	4-M-M	Muro madera CLT		Panel CLT	
<b>MIXTO</b>	5-MIX-H	Módulo semi cerrado		Placa alveolar	
<b>MÓDULO 3D</b>	6-3D-H	Módulo 3D hormigón prefabricado			
	7-3D-M	Módulos 3D CLT			

Tomando en cuenta las condiciones del Documento Básico Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación CTE-DB-SE [6], en el presente análisis se ha realizado la siguiente simplificación en los sistemas estructurales que serán sujetos del análisis comparativo:

- Se establecen los coeficientes parciales de seguridad para acciones y materiales así como, los coeficientes de simultaneidad para las acciones.
- Son generadas las combinaciones de Estados Límite Último ELU y Estado Límite de Servicio ELS para las acciones [7] [8] [9] [10].
- Se establecen las cargas gravitatorias: Carga permanente G y Sobrecarga de uso Q y N (no se toma en cuenta ningún empuje lateral).
- Se establecen los escenarios combinatorios de cargas y se selecciona la más desfavorable.
- Se realiza el proceso en reversa a la verificación de dimensionado con los ELU, es decir, se genera la incógnita dimensional en la ecuación que relaciona la resistencia de diseño con la del código, según sea el sistema, hormigón, acero, madera y según los esfuerzos de los elementos: Axiales, Flexión, Cortante y Deformación (este valor se relaciona con ELS).
- Según fabricante industrial, se seleccionan las dimensiones de elementos estructurales, iguales o mayores a las de predimensionado. Ver tabla 4 a 10 y figura 3 a 9.

Tabla 4. Predimensionado 1-P-H

Elemento	Dimensiones (cm)
Pilar con ménsulas	50 x 50
Vigas T y L	50 x (40+25)
Placa alveolar + capa de compresión	25+(5 x 120) x Longitud
Zapata	250 x 250 x 50



Fig. 3 Isométrico edificio 1-P-H

Tabla 5. Predimensionado 2-P-A

Elemento	Dimensiones (cm)
Pilar HEB 400	30 x 40
Vigas IPE 500	20 x 50
Chapa grecada + capa de compresión	14 x 88 x 0.08
Zapata	240 x 240 x 50

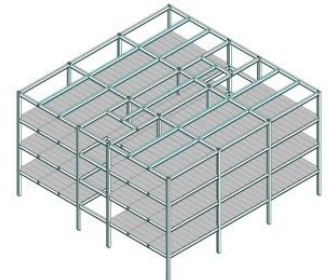


Fig. 4 Isométrico edificio 2-P-A

Tabla 6. Predimensionado 3-M-H

Elemento	Dimensiones (cm)
Muro de hormigón prefabricado	20 x 300 x Longitud
Placa alveolar + capa de compresión	25+5 x 12 x Longitud
Zapata corrida	140 x 80 x Longitud

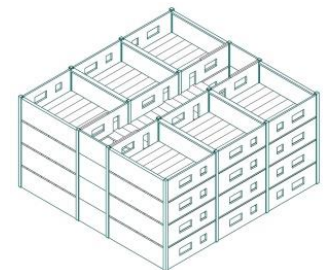


Fig. 5 Isométrico edificio 3-M-H

Tabla 7. Predimensionado 4-M-M

Elemento	Dimensiones (cm)
Muro de madera CLT	16.5 x 300 x Longitud
Paneles de forjado de madera CLT	22.5 x 330 x Longitud
Zapata corrida	120 x 60 x Longitud

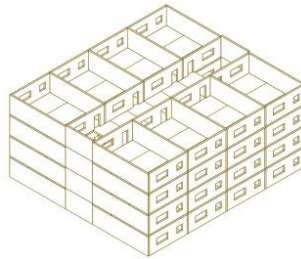


Fig. 6 Isométrico edificio 4-M-M

Tabla 8. Predimensionado 5-MIX-H

Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D semirrígido hormigón prefabricado	240 x 326 x 572
Placa alveolar + capa de compresión	25+5 x 120 x Longitud
Pavimento	30 x Superficie

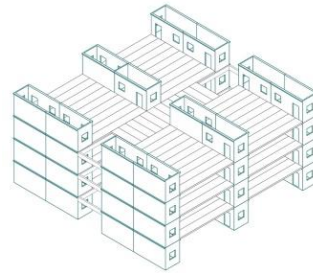


Fig. 7 Isométrico edificio 5-MIX-H

Tabla 9. Predimensionado 6-3D-H

Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D hormigón prefabricado	450 x 350 x 1000
Espesor paredes y tapa	12 + 15 nervios y 15
Pavimento	40 x Superficie

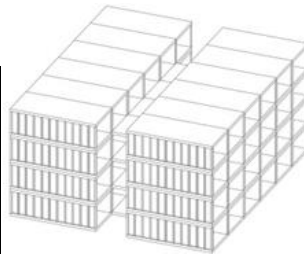


Fig. 8 Isométrico edificio 6-3D-H

Tabla 10. Predimensionado 7-3D-M

Elemento	Dimensiones (cm)
Módulo 3D de madera CLT	450 x 300 x 1000
Espesor paredes y tapa de madera CLT	16.5 y 18
Losa de fundación	30 x Superficie

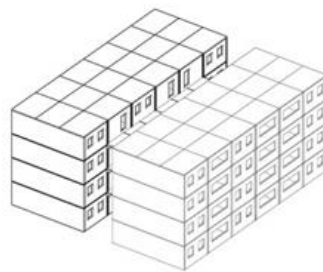


Fig. 9 Isométrico edificio 7-3D-M

La SETAC, World Council (2002), por sus siglas en inglés, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Sociedad de Toxicología Ambiental y Química) indica que el análisis de ciclo de vida ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad y prevé las siguientes funciones:

- Identifica y cuantifica el uso de materia, energía y los vertidos al entorno.
- Determina el impacto que el uso de recursos y los vertidos producen en el medio ambiente.
- Lleva a la práctica estrategias de mejora ambiental.

Un ACV incluye el ciclo completo de un producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de:

- Extracción, y procesamiento de materias primas.
- Producción, transporte y distribución.
- Uso reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición de residuos.

En este caso no se realiza ACV pero se estima un análisis de cargas ambientales por la fabricación y transporte, bajo una aproximación tipo Cradle to Gate (cuna a puerta) que contabiliza las cargas ambientales desde el origen de materias primas hasta la puerta de la fábrica según dos indicadores ICE.

Por otra parte, en tema de sostenibilidad las escalas de regulación van del ámbito internacional, regional y local, en este sentido en el ámbito internacional el Sistema Internacional EPD es un programa global regido por Naciones Unidas, para las declaraciones ambientales tipo III que operan de acuerdo con la norma ISO 14025. Un EPD por sus siglas en inglés Environmental Product Declaration es la declaración ambiental de productos que presentan información transparente, verificada y comparable sobre el impacto ambiental de los productos en el ciclo de vida.

En un ámbito más pragmático, la Comisión Europea en 2017 publica un informe de la serie ciencia al servicio de la política (Science for Policy) a través del Centro Común de Investigación denominado Level(s) que es el marco común de la UE de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de oficinas. En el informe se identifica en qué fase de un proyecto de construcción puede ser utilizado:

- Fase de diseño, basada en cálculos, simulaciones, y escenarios.
- Fase de ejecución, basada en los planos según construcción, las especificaciones y el seguimiento.
- Fase de finalización, basada en la puesta en servicio y a realización de pruebas.
- Fase de funcionamiento.

El sujeto de análisis es el edificio "X" en sus 7 versiones, y para realizar los escenarios comparativos de impactos ambientales se requiere que la fuente de datos sea homogénea y representativa, en este caso se establece como línea base, los datos de Inventory of Carbon and Energy (ICE) Versión 2.0 producido por Prof. Geoff Hammond y Craig Jones en enero 2011, del Department of Mechanical Engineering, de Bath University, del Reino Unido, pero se ha contrastado con los datos de las siguientes fuentes que son nutridas por los reportes de la industria:

- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña
- The International EPD System
- ECO Platform EPD e la Unión Europea
- Declaraciones Global EPD AENOR
- Programa DAP construcción, Agenda de la Construcción Sostenible.

#### IV. RESULTADOS

##### *Cálculo de impactos ambientales por fabricación*

Se presenta a continuación los resultados del cálculo de impactos denominados EE (Embodied Energy) y EC (Embodied Carbon) que es la Energía y CO<sub>2</sub> equivalente para cada uno de los elementos constructivos que conforman los 7 edificios de cuatro plantas. (Ver tabla 11 y Figuras 10 y 11).

Tabla 11. Área y peso de 7 edificios

edificio	SISTEMA	Área edificada (m <sup>2</sup> )	Peso edificio (T)	Peso (T/m <sup>2</sup> )
1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado	2570,40	1726,27	672
2-P-A	Pórticos de acero	2590,80	1430,24	552
3-M-H	Muros de hormigón prefabricado	2479,04	2391,89	965
4-M-M	Muros de madera CLT	2728,20	898,50	329
5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado	2621,44	1810,06	690
6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado	2548,80	3174,27	1245
7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT	2592,00	1135,54	438

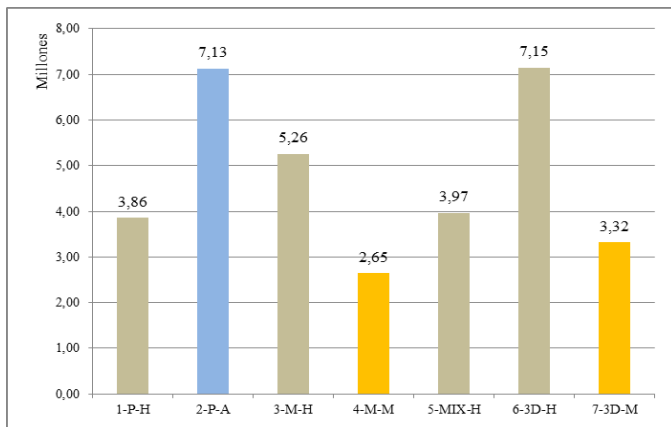


Fig. 10 Embodied Energy EE (MJ) fabricación

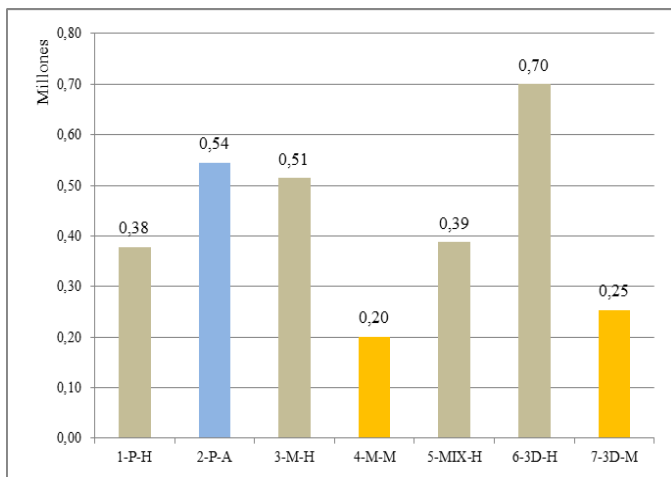


Fig. 11 Embodied Carbon EC (kg CO<sub>2</sub> equivalente) fabricación

Puede observarse en la figura 12 que la gráfica de doble eje, muestra evidencia que los edificios cuyo impacto es alto con relación a su peso representan una opción de alto impacto ambiental, es el caso del edificio de pórticos de acero 2-P-A.

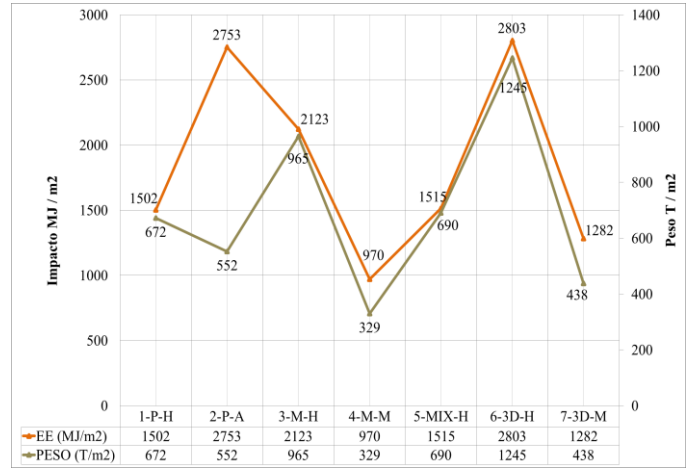


Fig. 12 Relación entre (T/m<sup>2</sup>) y (MJ/m<sup>2</sup>)

##### *Cálculo de impactos ambientales por transporte*

Los impactos por transporte de la fábrica a la obra, son estimados para un valor de impacto según el tipo de transporte, en este caso se ha tomado como muestra un vehículo de 14 toneladas para la mezcladora de hormigón in situ, y un vehículo de 40 toneladas para los elementos de construcción prefabricada e industrializada. Este dato se toma de la consulta a 3 empresas fabricantes en Cataluña. El valor de impacto ambiental está dotado según el tipo de transporte, en este sentido, para el vehículo de 14 toneladas el impacto es de 0,0022 MJ/kg.km y para el de 40 toneladas es de 0,0008 MJ/kg.km [11].

Se han determinado rangos de distancias, de 100 km para el transporte de hormigón a ser vaciado in situ como un parámetro excedido adrede para poderlo comparar, ya que el suministro generalmente no excede 25 km. Sin embargo para las distancias de los elementos de prefabricación industrializada se han tomado según sondeo de la ubicación de la industria e prefabricación industrializada en España, siendo 200 km para elementos de pórticos y muros de hormigón, de 600 km para las estructuras de acero, 800 km para los muros de madera CLT y de 1000 km para los módulos 3D de madera, pero en el caso de módulo 3D de hormigón se ha tomado de 200 km, puesto que la industria es cercana a Barcelona adonde podría ubicarse hipotéticamente el edificio "X" (Fig. 13).

En la figura 14 se presentan los impactos por transporte y fabricación así como la relación comparativa entre ambos, siendo de hasta 121 veces mayor el impacto por fabricación que el de transporte (Fig. 14) aun para el edificio 6-3D-H, el que más pesa.

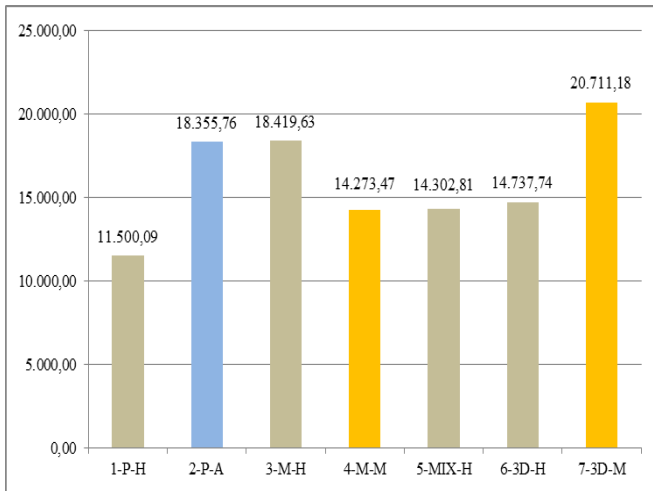


Fig. 13 Embodied Energy EE (MJ) transporte

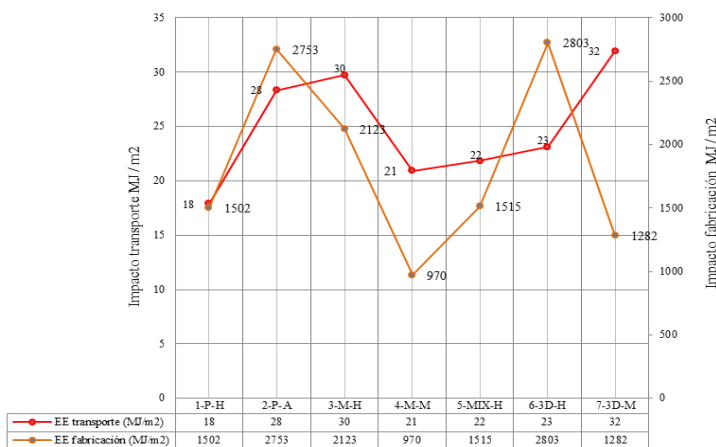


Fig. 14 Relación entre EE transporte (MJ/m²) y EE fabricación (MJ/m²)

## V. DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados del análisis para establecer el potencial de evitar impactos, aplicando 3 conceptos (Ver Fig. 15 y 16):

a) **Reutilización:** Proceso para volver a utilizar elementos desechados y darles un uso igual o diferente. Este concepto se aplicará para evitar impactos, como la capacidad de los elementos de construcción industrializada para mantener su función estructural en caso de ser desmontado y tener que ser ensamblado nuevamente, para una segunda vida útil [12]. La valoración de impactos evitados en el análisis se pondera a través de cinco porcentajes 10, 25, 50, 75, 90 por ciento, siendo 10% un bajo potencial de reutilización que es aplicado al hormigón in situ y el 90% es aplicado a aquellos elementos con un alto potencial de reutilización, a los que se estima, no pierden su capacidad resistente debido al tipo de unión generalmente articulado usual en las estructuras de prefabricación industrializada.

b) **Durabilidad:** Es una cualidad de la calidad de un material, se refiere al tiempo que permanece cumpliendo sus funciones sin perder sus atributos para lo que ha sido diseñado. Para que la durabilidad se mantenga en el tiempo en las estructuras, el Código Técnico de la Edificación CTE recomienda que el mantenimiento sea dado al menos cada 10 años. En este sentido se ha optado por hacer una valoración de 0 a 10 años siendo correlativo con el porcentaje de 0 a 100 por ciento. Por tanto cuanto mayor es el período de mantenimiento en cantidad de años, mayor es la cantidad de impactos evitados por durabilidad.

c) **Funcionabilidad:** Utilidad práctica de un elemento, en un edificio la funcionabilidad puede ser sinónimo de área útil, destinada a la función para la que ha sido creado, es decir los espacios servidos, y con cierta reserva pueden ser clasificados como espacios funcionales las áreas destinadas a circulación y accesos, quedando fuera de esta clasificación el área de estructuras. Por tanto, para cada edificio se ha obtenido el porcentaje que representa el área útil de la planta del edificio, es decir, solo el área de viviendas y este es el porcentaje que se valora como impacto evitado, siendo el mayor porcentaje de área, la mayor impactos evitados. Este parámetro también se considera como parámetro de eficiencia estructural.

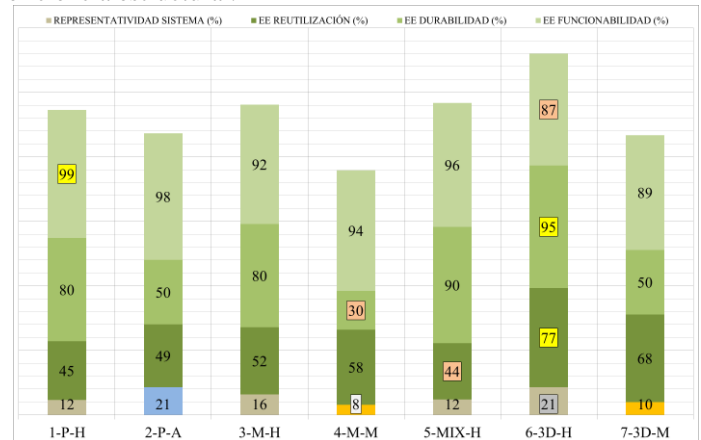


Fig. 15 Impactos evitados Embodied Energy EE (%)

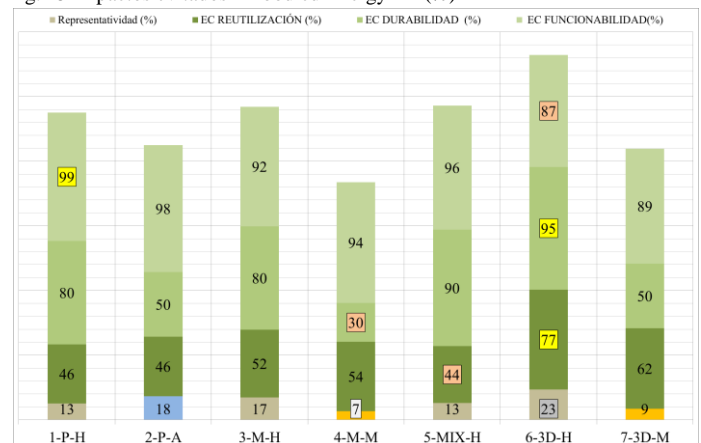


Fig. 16 Impactos evitados Embodied Carbon EC (%)



## VI. CONCLUSIONES

Con respecto a la fase de investigación se concluye:

1. La construcción industrializada ha venido evolucionando hace casi un siglo, sin embargo, aún no es asequible a todos los sectores ni en todos los países, pero son destacables los esfuerzos de las promociones de vivienda que potencian la construcción industrializada como estrategia de optimización de recursos y desarrollo e innovación tecnológica.

Con respecto a la fase de desarrollo se concluye que:

2. El anteproyecto estructural y predimensionado ante carga gravitatoria, es una muestra representativa para una evaluación y toma de decisión en las etapas tempranas de un proyecto, pero para la etapa decisiva es requerido todo el escenario demandante de la estructura, que llevan al equipo de diseño a considerar sistemas híbridos entre fabricación industrializada abierta y cerrada o entre sistemas prefabricados y sistemas in situ.

Con respecto a la fase de análisis se concluye que:

3. La relación de los factores ICE que valoran el impacto ambiental de un material en una determinada etapa del ciclo de vida no son representativos del impacto de una edificación y no es indicador de superioridad en impactos, hasta que se realiza la evaluación según las características del edificio. por ejemplo; el factor ICE del acero laminado es de 21,5 MJ/kg contra el de hormigón prefabricado RC 40-50 MPa que es de 2,33 MJ/kg siendo el del acero 9 veces mayor que el de hormigón, sin embargo, en la relación entre impactos ambientales de los edificios hay una relación de 2 a 1 del acero respecto al hormigón en MJ/m<sup>2</sup>. Así mismo, la relación entre factores ICE de madera CLT es igual a 3,63 MJ/kg y el hormigón prefabricado es de 1,5 veces menor al de la madera en MJ/m<sup>2</sup>, sin embargo la relación entre impactos de los edificios de hormigón es 2 veces mayor el hormigón que la madera.

4. En la relación de impactos por fabricación y transporte, la fabricación supera hasta 75 veces más en promedio al transporte, evaluando distancias de hasta 1000 km con edificios que pesan hasta 3000 toneladas.

5. El transporte está ligado a la distancia como al peso de los elementos transportados, por tanto, al optar por tecnología pesada debe hacerse a corta distancia en este caso se ha considerado 200 km, aunque por otra parte la relación bajo peso, bajo impacto en transporte, es evidente para el caso de los edificios de madera, sobre todo en el caso de los muros, ya que en el caso de la módulos 3D de madera, el volumen es sinónimo de impacto mayor al peso, pues al transportar la unidad 3D es más aire que masa de material la que se transporta.

6. En torno a los impactos evitados por reutilización, los elementos menos especializados y menos frágiles, en

sentido opuesto a cualidades como monolitismo y robustez son susceptibles de ser reutilizables hasta un 50 por ciento más que los que son muy especializadas.

7. En torno a los impactos evitados por durabilidad, este aspecto presenta retos interesantes en las filosofías de diseño, pues entre más hiperestática sea una estructura menos reutilizable es, por tanto el reto consiste en diseñar el edificio con elementos de sacrificio para que otros puedan ser recuperados y reutilizados.

8. En torno a los impactos evitados por funcionabilidad el caso más ilustrativo es el de pórticos de acero, pues los impactos son considerables, pero dadas sus características mecánicas, es el sistema estructural que permite mayor flexibilidad en el diseño y una planta más diáfana.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Profesores Jorge Blasco y a Albert Albareda por su asesoría en temas de cálculo estructural y al apoyo de Adrián Muros, Director del Máster Universitario en Estudios Avanzados en Arquitectura-Barcelona, MBArch, línea, Innovación Tecnológica en la Arquitectura, ITA de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, ETSAB, Universidad Politécnica de Catalunya, UPC, España.

El estudio completo puede ser recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/166482>

Agradecemos también a la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA en El Salvador.

## REFERENCIAS

- [1] Ley 16/2017 del Cambio Climático. DOGC N° 7426, BOE N°234 Legislación Consolidada referencia BOE-A-2017-11001. (2017). Comunidad Autónoma de Cataluña.
- [2] Norma UNE-EN 15804:2012+A1. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. (2014). Norma Española versión de Norma Europea UNE-EN 15804:2012. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. España.
- [3] Albus, J. (2018). Construction and design manual. Prefabricated housing. Volume 1. Technologies and Methods. Berlin, Germany: DOM Publishers.
- [4] Chemillier, P. Traducido por Bonaventura Bassegoda i Musté. (1980). Industrialización de la construcción. Barcelona, España: Reverte, Editores Técnicos Asociados.





- [5] FIP-ATEP. (1996). Estructuras de edificación prefabricadas. Madrid, España: Asociación Técnica Española del Pretensado. ATEP.
- [6] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, CTE-DB-SE. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [7] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación, CTE-DB-SE-AE. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [8] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acero, CTE-DB-SE-A. (2007). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [9] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Cimientos, CTE-DB-SE-C. (2007). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [10] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Madera, CTE-DB-SE-M. (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [11] París, O. (2014). La "clientalización" de los sistemas industrializados de fachada. Una estrategia de producción para la "clientalización" de la forma de los componentes planos de hormigón. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Recuperado en junio 2019: <http://hdl.handle.net/2117/94894>
- [12] Asam, C. (2007). Recycling prefabricated concrete components a contribution to sustainable construction. 2018, de Research in Architectural Engineering Series, Improving the quality of existing urban building envelopes. Structures. IOS Press, Delft University Press, Volume 4. Recuperado en junio 2019: <https://es.scribd.com/document/199243285/Quality-of-existing-buildings>.