

## Prototipos virtuales para la industrialización abierta de la construcción: un caso de estudio

*Pedro Samaniego<sup>1</sup>, Esteban Samaniego<sup>2</sup>, Augusto Samaniego<sup>3</sup>, Francisco Astudillo<sup>3</sup>, Michelle Díaz<sup>3</sup>, Dolores Cordero<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Universidad del Azuay, Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo, Cuenca, Ecuador, 01.01.981.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador, 01.01.168.

<sup>3</sup> Estudio de Arquitectura y Diseño (AyD), Av. Loja 5-700 y Don Bosco, Cuenca, Ecuador, 01.01.14.

Autor para correspondencia: pedro.samaniego@gmail.com

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

### RESUMEN

La industrialización no ha tenido un impacto importante en el sector de la construcción. La ineficiencia asociada con la falta de herramientas adecuadas para “probar antes de construir” es endémica. Se adopta aquí el paradigma de la industrialización abierta y el uso de prototipos virtuales para estudiar un sistema constructivo específico. Se exploran las posibilidades de dicho sistema y se muestran las capacidades de la modelización virtual de construcciones para detectar incompatibilidades entre elementos prefabricados cuando estos se integran.

Palabras clave: Industrialización abierta, prototipo virtual, sistema, prefabricación.

### ABSTRACT

Industrialization has not yet had a notorious impact in the construction sector. Inefficiencies associated with the lack of reliable tools to simulate the building process are pervasive. Here, we adopt the so-called open-industrialization paradigm and use virtual prototyping to study a specific construction system. We explore the possibilities of this system and show the capabilities of virtual building modeling to detect inconsistencies when prefabricated elements are integrated.

Keywords: Open-industrialization, virtual-prototyping, system, prefabrication.

## 1. INTRODUCCIÓN

La revolución industrial tuvo su origen en el Reino Unido a finales del siglo XVIII. Sin embargo, esta no tuvo impacto notorio sobre la construcción de edificios, la cual continuó (y continúa) basándose en el uso de materiales y procesos tradicionales. A inicios del siglo XX, algunos arquitectos como Mies, Gropius y Wright mostraban su preocupación por la falta relación entre la construcción y la industria. Otros, como Le Corbusier, por ejemplo, tomaron como inspiración los productos de la industria (*la máquina de habitar*; González, 2008).

En una comparación realizada entre la industria manu-facturera y la industria de la construcción en los EE.UU. (Li *et al.*, 2008), en la cual se consideran los últimos 40 años, se observa que la primera ha tenido mejoras anuales de un 10%, mientras que la segunda ha tenido un declive constante en su rendimiento. Esto se debe principalmente a que la industria de la construcción no tiene una plataforma eficiente que capture y que permita una retroalimentación del conocimiento generado tanto en el diseño como en el proceso de construcción. Además de no tener una línea fija de producción, no tiene la capacidad de hacer pruebas, modelos o prototipos antes de construir, es decir, no hay un “try before

build". En la construcción tradicional se arranca cada proyecto con poca información previa, no hay un proceso de retroalimentación y de mejora continua (Li *et al.*, 2008).

Ante esto, cabe preguntarse qué papel ha desempeñado la industrialización en la construcción. El primer gran impulso en este sentido se remonta a la época de la posguerra en Europa, en la cual gran cantidad de viviendas eran necesarias. El tipo de industrialización que se planteó es la llamada *cerrada* (Salas, 2008). Esta se basa en proyectos masivos, en los que se ensamblan grandes elementos realizados ad hoc para cada caso, lo cual implica el uso de maquinaria pesada. Existe una opinión generalizada en la literatura especializada (Pérez, 2009) de que se ha producido un declive en la utilización de este tipo de sistemas constructivos, asociados a la prefabricación pesada especialmente con hormigón. Se ha planteado como una nueva opción la llamada industrialización *abierta*, la cual se basa en la coordinación racional de elementos industrializados provenientes de diferentes proveedores para generar soluciones adecuadas para problemas específicos (Águila *et al.*, 2011). En definitiva, se pretende construir soluciones adaptadas mediante la coordinación de elementos prefabricados.

En el Ecuador la industrialización de la construcción mantiene una situación incipiente parecida a la del resto de Latinoamérica. Esta afirmación se desprende del análisis de las empresas que utilizan técnicas industrializadas presentadas en el Ecuador (Samaniego, 2011).

En este marco, la llamada *industrialización sutil* surge "tratando de describir cómo llegan a las obras: elementos, componentes y subsistemas de origen industrial" (Salas, 2000). Salas señala que "con respecto a la procedencia de los elementos, componentes y subsistemas: si gran parte de los más significativos con los que se materializa la vivienda o edificio, proceden de una única industria o grupo industrial, estaríamos tentados de nominarla como *industrialización sutil cerrada*". "Cuando las procedencias son variadas, y más aún si son muy diversas, la propuesta -pese a su aparente contradicción- sería nominarla como *industrialización abierta*".

Ante estas nuevas formas de industrialización, la labor de coordinación se vuelve clave para lograr calidad y productividad. En definitiva, es necesario "industrializar el proyecto", como momento privilegiado en el cual se da forma a la solución constructiva. Por ejemplo, la metodología del Diseño y Construcción Virtual (VDC por sus siglas en inglés) tiene como objetivo enfocarse en las metas de un proyecto y reducir los recursos innecesarios (tiempo, capacidad e inventarios), a lo largo de las etapas de definición, diseño e ingeniería, fabricación, instalación y entrega final, sin comprometer sus estándares de calidad, niveles de prevención de riesgos y cuidado del medio ambiente (Taboada & Alcántara, 2014).

En este artículo, se pretende explorar las capacidades del uso de prototipos virtuales para la labor de coordinación de elementos industrializados para la construcción. En definitiva, se trata de probar mediante un caso de estudio, las posibilidades de la simulación informática de la construcción para lograr una fase de ejecución más eficiente. Para esto, analizaremos el caso de un sistema constructivo que pretende ser universal en sus elementos pero adaptable a programas específicos. Se mostrará como el ensamblaje virtual de estos elementos permite explorar las posibilidades del sistema constructivo y detectar incompatibilidades en el proceso de integración. La noción subyacente es que la construcción virtual constituye una herramienta fundamental para "industrializar el proyecto".

## 2. SISTEMA CONSTRUCTIVO

El sistema constructivo que se propone nace de la falta en el mercado del Ecuador de un sistema constructivo industrializado que sea de carácter abierto y que utilice materiales industrializados disponibles en el mercado nacional. Esto es, existen elementos industrializados, pero no existen formas suficientemente racionalizadas para integrarlos.

Se trata de un sistema ligero y abierto que integra un kit de elementos estructurales (viga, columna y acoples) industrialmente producibles off-site que pueden ser fácilmente armados y ensamblados on-site. La ventaja de este sistema es la flexibilidad en la organización de los módulos. Su concepción se origina de la consideración conjunta de los espacios tipo (función), de la definición del módulo

constructivo (dimensión, estructura y montaje) y de la definición de los cierres (acabados y posibilidades formales).

### 2.1. Determinación de espacio tipo

Partiendo de los posibles espacios necesarios para cumplir con las funciones básicas como las sociales, descanso, higiene personal y servicios, se determinaron los espacios tipo: dormitorio, sala-comedor, baños (padres, hijos y social), cocina y escaleras, tal como se ilustra en la Fig. 1, 2 y 3.

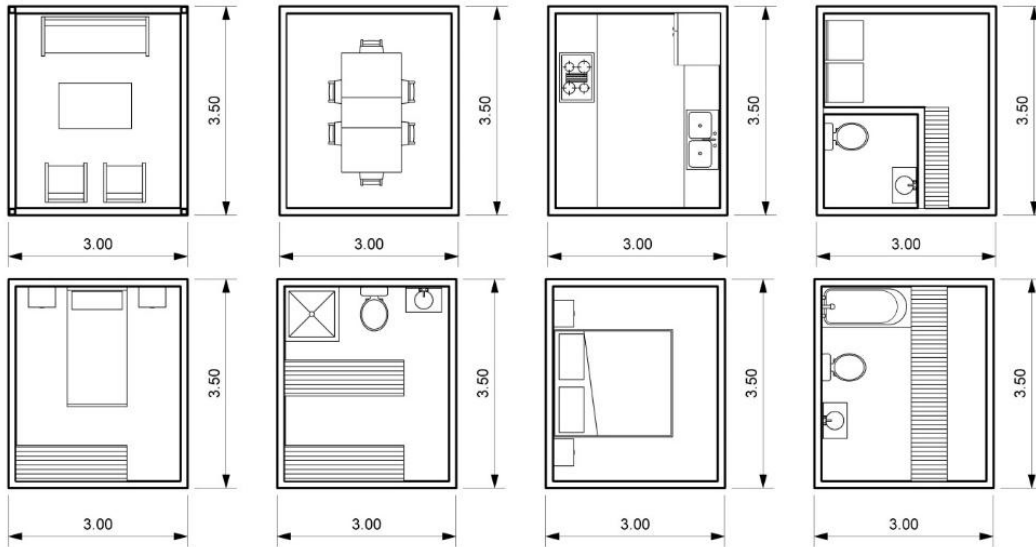


Figura 1. Espacios tipo de 3.00m x 3.50m.

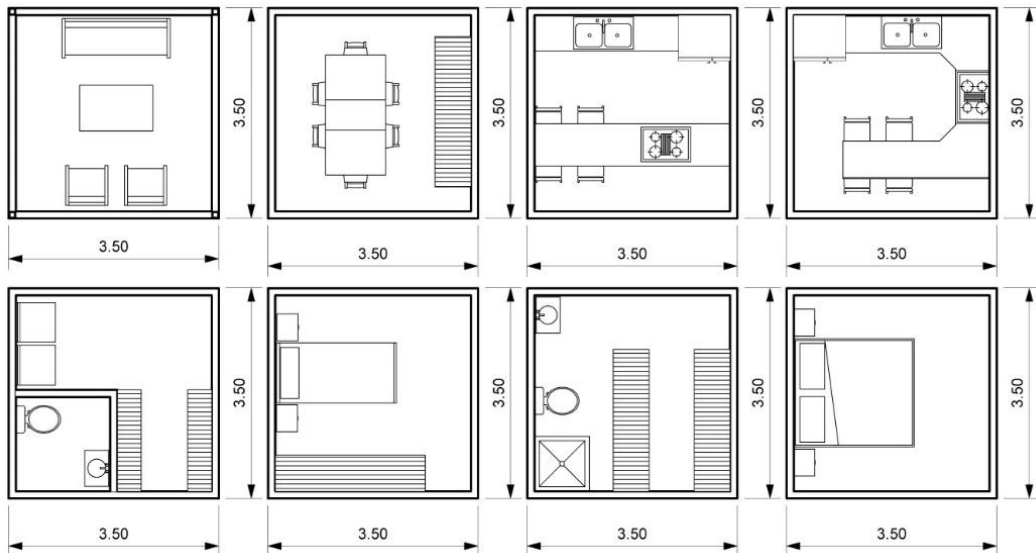


Figura 2. Espacios tipo de 3.50m x 3.50m.

### 2.2. Definición del módulo

En la definición del módulo están implícitos los principios de “racionalización, organización geométrica y dimensional encaminados a perfeccionar las estrategias de industrialización.” (Salas, 2000). Los espacios tipo fueron la base para establecer el sistema de modulación. Se optó por la selección de tres módulos, cuyas dimensiones permiten configurar diversas combinaciones para conformar una unidad de vivienda (ver Fig. 4 y 5).

El dimensionamiento de los tres módulos está basado en los requerimientos funcionales (actividades y mobiliario), en los materiales existentes en el mercado nacional y en las posibilidades estructurales.

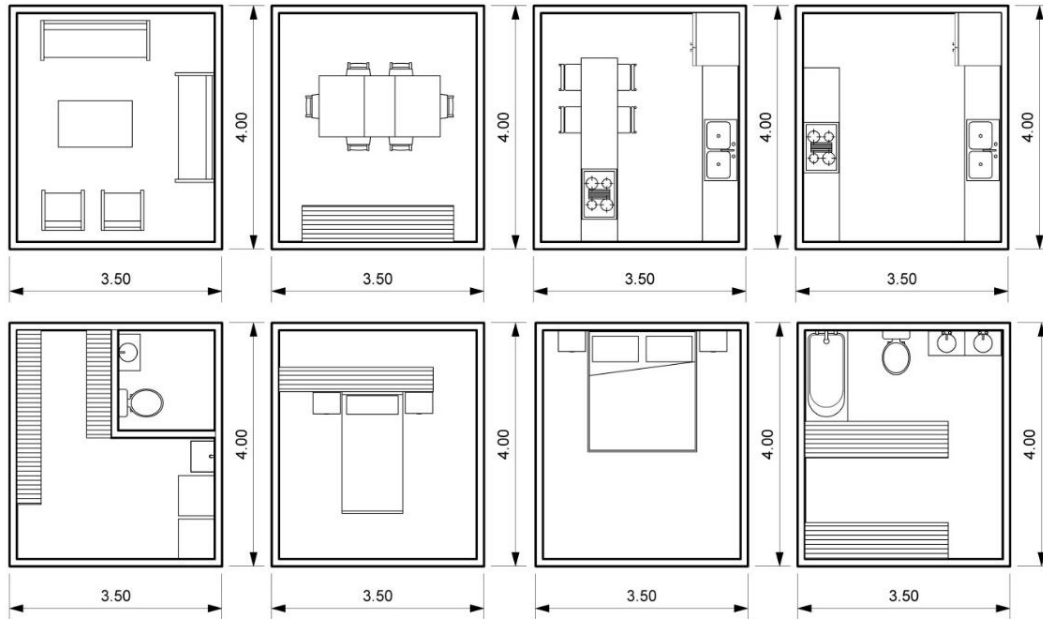


Figura 3. Espacios tipo de 3.50m x 4.00m.

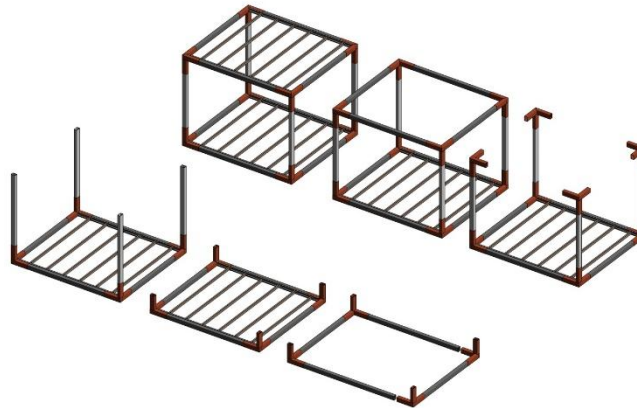


Figura 4. Proceso de armado de estructura de los módulos.

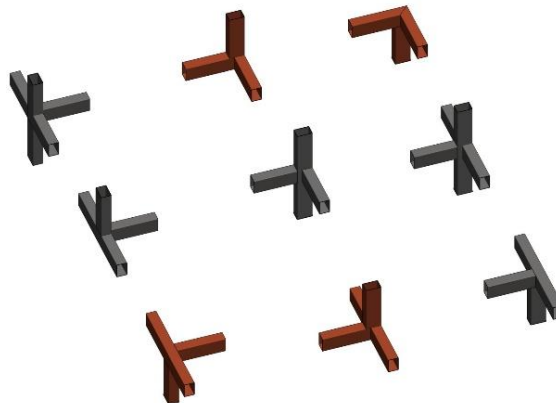


Figura 5. Ejemplos de los tipos de uniones de la estructura de los módulos.

### 2.3. Definición de Cierres

Dentro del concepto de cierres se encuentran las fachadas (definidas por la relación con el exterior), las particiones internas (definidos por el programa) y los entresijos (definidos por la separación espacial). Estos componentes pueden ser elegidos libremente de los que existen en el mercado nacional.

Los elementos de cerramiento se acoplan dimensionalmente a los módulos seleccionados y se fijan a la estructura metálica, lo cual facilita el montaje.

Para los cierres se tomó en cuenta un catálogo (Samaniego, 2011) de materiales producidos industrialmente, ya disponibles en el mercado nacional. Esto posibilita una configuración variada de las fachadas, las divisiones internas, pisos, cielo raso y cubierta.

En las uniones entre módulos y elementos se evita las juntas húmedas y se prefiere el uso de los sistemas de atornillado y machimbrado (junta seca).

## 3. CASO DE ESTUDIO

### 3.1. Descripción general

El caso de estudio corresponde al diseño de una vivienda, para lo cual se consideraron algunos factores demográficos y de uso de suelo, a fin de definir el programa. El diseño se realizó sobre la base de los requerimientos programáticos, los módulos estructurales planteados, los tipos de envolvente definidos, y las necesidades de instalaciones de equipos de la vivienda. Esto se modeló al inicio, para luego comenzar a realizar mejoras y ajustes hasta lograr un óptimo en diseño y construcción de esta vivienda.

### 3.2. Programa de una vivienda tipo

El programa que se definió considerando una familia de 3, 4 hasta 5 miembros (Figs. 6 y 7), que corresponde al 55% de hogares que hay en el Ecuador (Villacís & Carrillo, 2012). Para esto se propuso un programa que permita funcionar con este tipo de familias. Se planteó resolver el programa en dos plantas para optimizar el uso del suelo. En planta baja se ubicaron el área social (sala-comedor) y el área de servicio (cocina y lavandería). En planta alta se ubicaron las zonas de descanso y aseo (dormitorios y baños), que podrían variar según el tipo de familia.

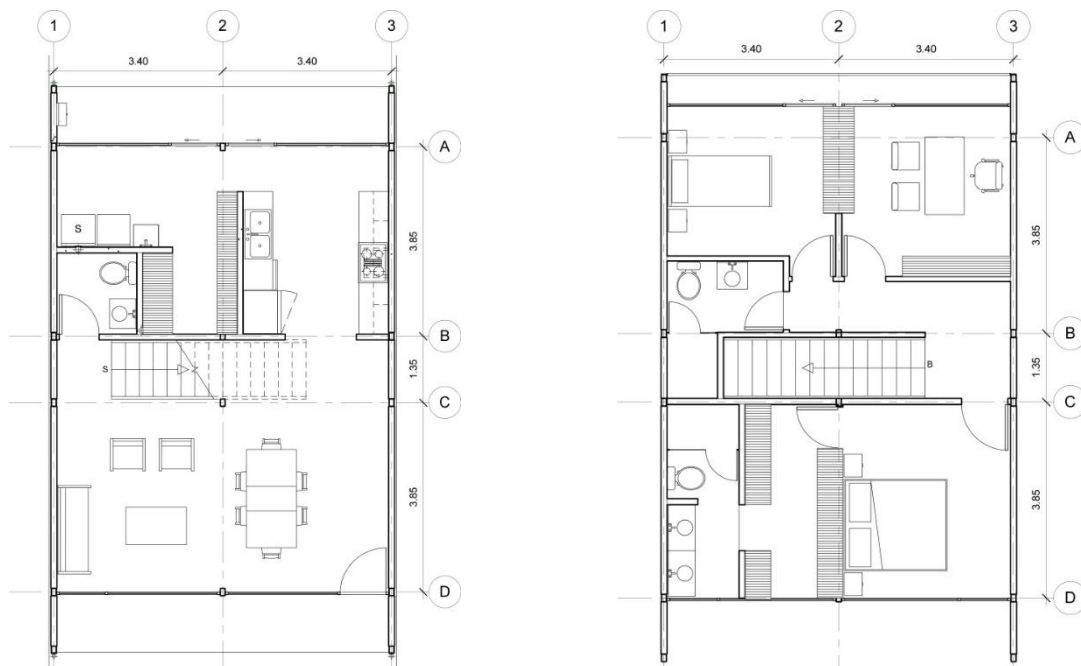
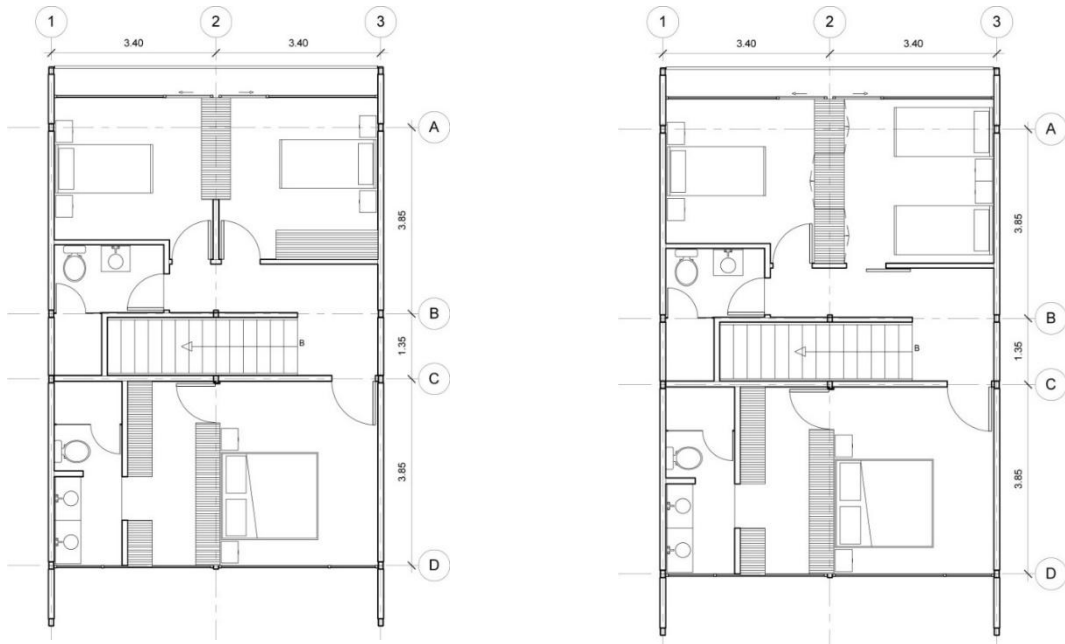


Figura 6. Planta baja (izquierda) y planta alta opción 1 (derecha).



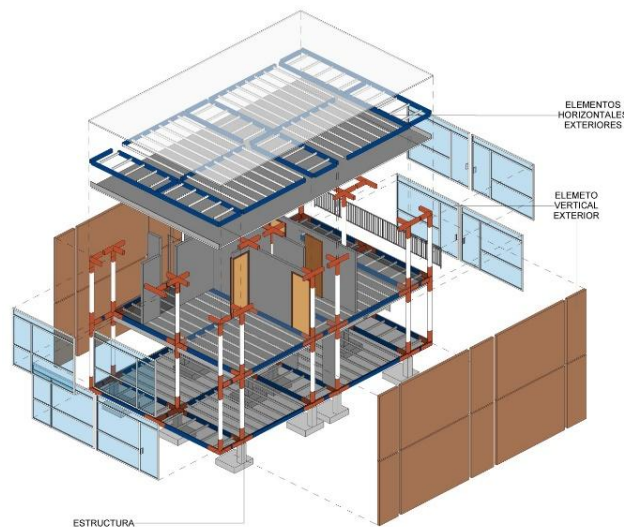
**Figura 7.** Planta alta opción 2 (izquierda) y planta alta opción 3 (derecha).

### 3.3. Construcción virtual de la vivienda tipo

El diseño de la vivienda se resolvió en conjunto, considerando el partido formal (estética), funcional (programa de requerimientos) y constructivo (estructura y envolventes). Esto dió como resultado un modelo virtual inicial (prototipo virtual).

El proceso de modelamiento del prototipo virtual se inició con la definición de elementos funcionales o unidades de proyecto (Salas, 2008). Estos elementos pueden concebirse como grupos de soluciones constructivas reales que son objeto de decisiones conjuntas de diseño y que, a la hora de realizar la descomposición de una edificación, se pueden materializar mediante componentes industrializados. Sobre la base de (Salas, 2008), se adopta aquí la siguiente lista de elementos funcionales (ver Fig. 8):

1. Estructura (cimientos y pórticos).
2. Elementos horizontales (exteriores e interiores).
3. Elementos verticales (exteriores e interiores).
4. Accesos (escaleras).
5. Equipos de la vivienda (instalaciones hidráulicas, sanitarias, gas y eléctricas).

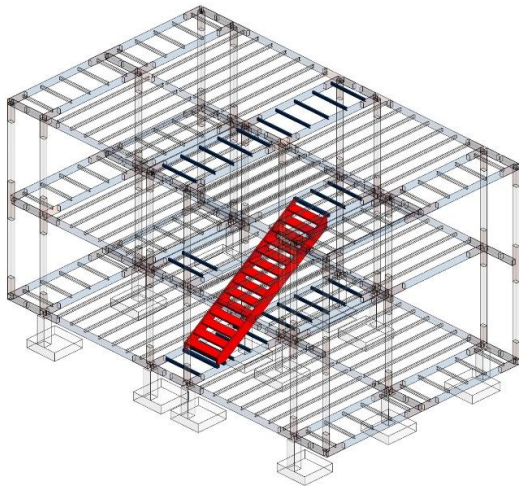


**Figura 8.** Estructura, elementos horizontales y verticales.

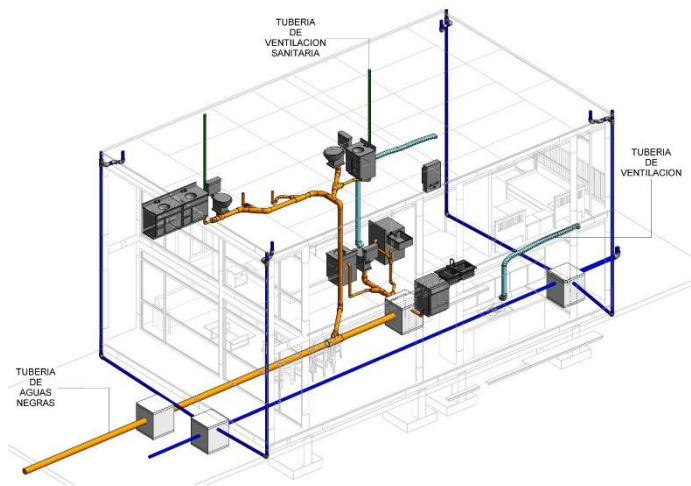
Comenzando la modelización desde la estructura -las excavaciones, los cimientos y finalmente los elementos de los pórticos (columnas y vigas)-, donde se utilizan los módulos estructurales planteados, se procedió, luego, a modelar los elementos verticales y horizontales, empezando por las envolventes exteriores y prosiguiendo con los interiores.

Uno de los elementos funcionales o unidades de proyecto que se resolvió como una parte especial es la escalera, porque tiene una condición y función específica, que es la circulación vertical dentro de la vivienda (ver Fig. 9). Esta puede ser un componente específico de procedencia industrial. La Organización Internacional de Normalización (ISO) define los componentes de construcción como “productos fabricados a modo de unidades distintas, dispuestas para entrar a formar parte en la construcción de una obra” (Salas, 2008).

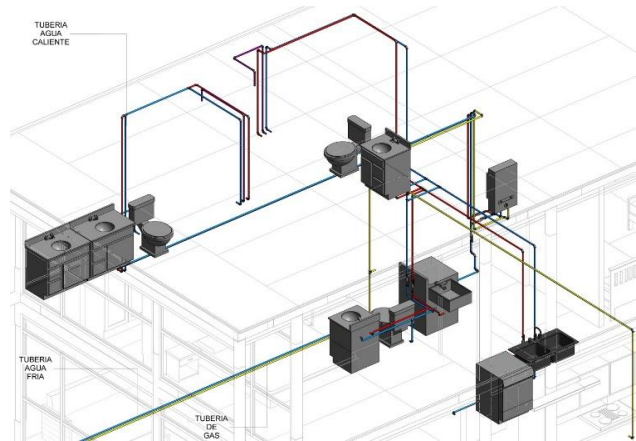
Al final se modeló lo referente a los equipos de vivienda, que corresponden a las instalaciones necesarias para un buen funcionamiento de la vivienda (ver Figs. 10 y 11).



**Figura 9.** Unidad funcional: escalera (acceso).



**Figura 10.** Instalaciones sanitarias y agua lluvia.



**Figura 11.** Instalaciones de agua fría, caliente y de gas.

### 3.4. Verificación de la construcción mediante el prototipo virtual

El prototipo virtual permite analizar cada paso de las actividades de construcción, mediante un proceso de ejecución virtual de la construcción. Esto muestra los posibles problemas o interferencias entre los diferentes elementos de la vivienda, y que deben recibir una alternativa que solucione esto, y así comenzar de nuevo con el proceso de simulación, y verificar si la solución propuesta es adecuada (ver Figs. 12, 13 y 14, las interferencias se han señalado en rojo).



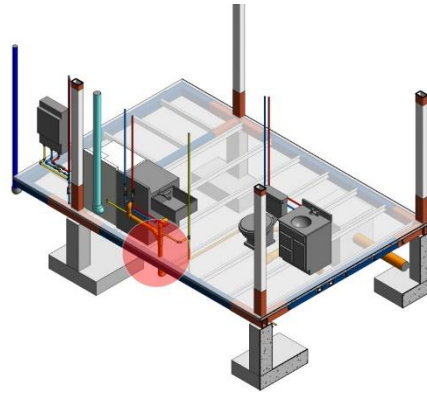
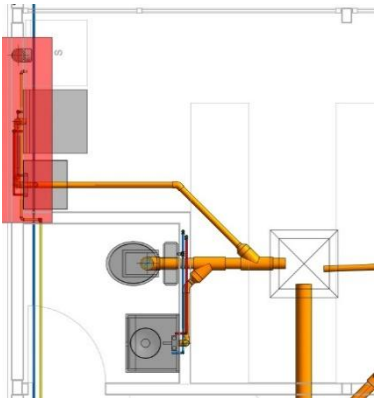


Figura 12. Identificación de problemas 1.

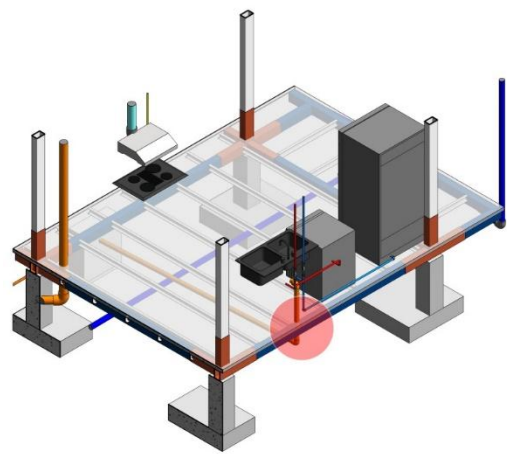
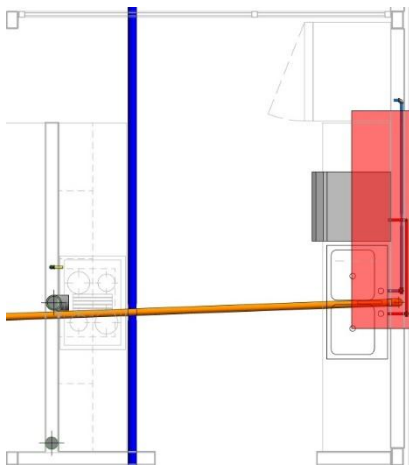


Figura 13. Identificación de problemas 2.

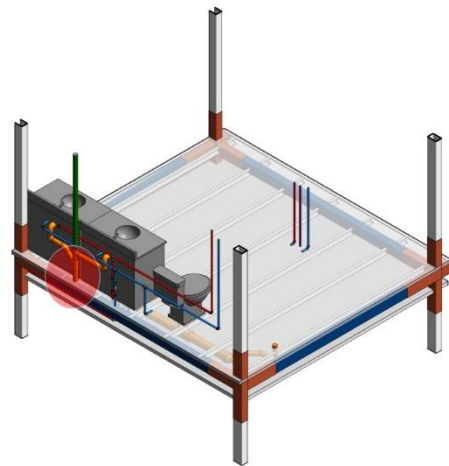
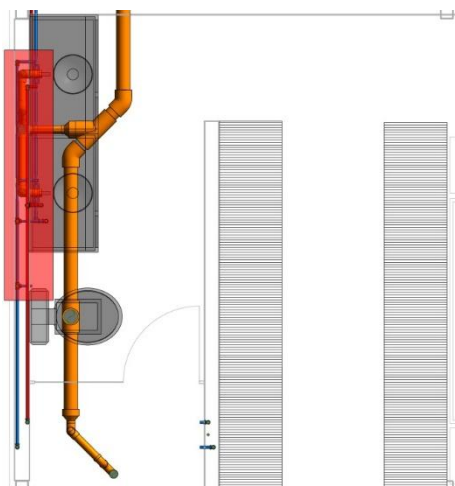


Figura 14. Identificación de problemas 3.

Mientras este método de prueba y error continúa, se puede evaluar y mejorar el proceso de construcción de manera prospectiva. El uso de la tecnología de simulación virtual, evita el incremento del costo en el presupuesto y del tiempo en el cronograma, reduce la mayoría de los riesgos y problemas de construcción, ya que estos pueden ser identificados y resueltos en el prototipo virtual y no en obra.



En el caso de estudio, uno de los primeros pasos fue verificar algunos detalles de acoplamiento entre la estructura y los elementos horizontales y verticales. Después se agregó el acceso vertical, que corresponde a la escalera, y por último se incorporaron los equipos de la vivienda.

El proceso de ir modelando virtualmente las diferentes unidades del proyecto, permitió solucionar algunas interferencias y problemas de la construcción virtual, y también la optimización del diseño, de las soluciones constructivas y de los procesos de montaje (Li *et al.*, 2011).

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha explorado la posibilidad de utilizar prototipos virtuales para el análisis de la integración de elementos industrializados en un sistema constructivo. Para esto se usó un caso de estudio que, si bien no corresponde a ningún proyecto real particular, tiene características que lo colocan como representativo de una vivienda tipo. Se utilizaron para su concepción un análisis de las funciones habituales de una familia tipo en Ecuador, además de ideas sobre modulación y sobre coordinación dimensional. Todo esto se realizó dentro del marco conceptual de la llamada industrialización abierta.

Otra característica que le da realismo al estudio realizado es el hecho de que gran parte de los elementos utilizados proviene de un catálogo de productos industrializados existentes en el Ecuador. A esto se ha añadido una propuesta fácilmente ensamblable para resolver la estructura. Al juntar estos ingredientes se consigue un sistema constructivo con grandes posibilidades.

Se han mostrado, además, las potencialidades de la construcción virtual para la detección de incongruencias y errores antes del proceso de construcción real. Esto implicaría ahorros importantes, así como el incremento de seguridad y fiabilidad durante dicho proceso.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad del Azuay por el financiamiento brindado para esta investigación a través del proyecto de la Carrera de Arquitectura *Coordinación dimensional en el proyecto arquitectónico: Caso de la industrialización sutil en la vivienda para la zona andina del Ecuador*.

#### REFERENCIAS

- Águila, A., S.M. Castro, M. García, P. Rosa. 2011. *Hacia una nueva vivienda social flexible mediante la investigación de procesos productivos industriales innovadores*. 4IAU 4ª Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo, Valencia, 12 pp.
- González, J.A., 2008. *Proceso continuo de industrialización*. En: VSE La vivienda social en Europa. Alemania, Francia y Países Bajos desde 1945. Maireia Libros, Madrid, pp. 115-137.
- Li, H., H.L. Guo, M. Skitmore, T. Huang, K.Y.N. Chan, G. Chan. 2011. Rethinking prefabricated construction management using the VP-based IKEA model in Hong Kong. *Constr. Manag. Econ.*, 29(3), 233-245.
- Li, H., T. Huang, C.W. Kong, H.L. Guo, A. Baldwin, N. Chan, J. Wong, 2008. Integrating design and construction through virtual prototyping. *Automation in Constructio.*, 17(8), 915-922.
- Pérez, S., 2009. Industrializar: Do it industrial. *Informes de la Construcción*, 61(513), 5-10. Disponible en <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/760/845>.

- Salas, J., 2000. La industrialización posible de la vivienda latinoamericana. Editorial ESCALA, Bogotá, Colombia.
- Salas, J., 2008. De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. *Inf. Constr.*, 60(512), 19-34.
- Samaniego, A., 2011. *Catálogo de sistemas constructivos industrializados para vivienda en el Ecuador*. Informe, Universidad de Cuenca, Facultad de Arquitectura, Cuenca, Ecuador.
- Taboada, J., V. Alcántara, 2014. Toma de decisiones y revisión de diseño a partir de la construcción digital y la aplicación de la metodología VDC. Disponible en <http://www.portaldeingenieria.com/archivos/publicaciones/usuarios//CCP.86.PDF>.
- Villacís, B., D. Carrillo, 2012. *País atrevido la nueva cara socio demográfica del Ecuador*. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Quito, Ecuador.