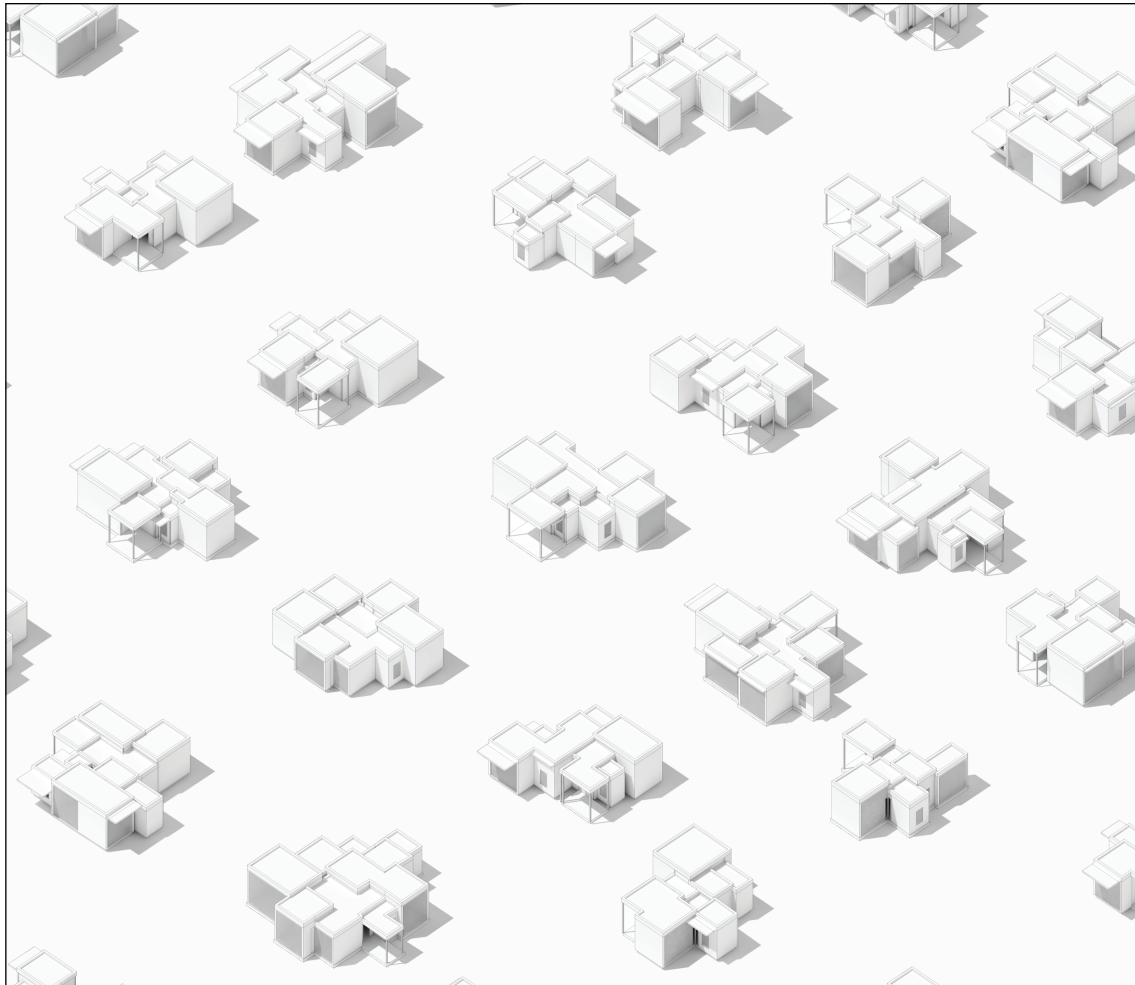




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA



## **DISEÑO ARQUITECTÓNICO ÍNTEGRAMENTE ASISTIDO POR ORDENADOR**

Javier Alfonso Bono Cremades

Trabajo Final de Grado tutorizado por Pedro Molina Siles  
Universitat Politècnica de València. ETSA. Septiembre 2016



*A mi familia en general, y a mi abuelo, Alfonso Cremades, en particular.*

## **Palabras clave**

Arquitectura, automatización, diseño paramétrico, organización espacial, customización.

## **Resumen**

La arquitectura presenta un modelo productivo artesanal que la vuelve vulnerable, por su baja productividad, a una progresiva liberalización de la profesión y a una oferta cada vez mayor. Una de las vías de investigación para el aumento de la productividad se basa en la aplicación de procesos de automatización al ejercicio de la arquitectura.

Desde el siglo XVIII hasta la actualidad numerosos arquitectos han tratado de establecer metodologías de diseño capaces de automatizar el proceso de diseño, son célebres las incursiones en este campo de J.N.L.Durand, Le Corbusier, Buckminster Fuller, Juhani Pallasmaa y Christopher Alexander. En las últimas tres décadas se han desarrollado experimentalmente modelos informáticos con capacidad de proyectar independientemente cualquier tipo de edificio, permitiendo elevados niveles de customización por parte del consumidor.

Este trabajo describe el proceso de desarrollo, a partir de herramientas de diseño paramétrico, de un sistema automático capaz de proyectar, a partir de unos determinados inputs variables, una vivienda unifamiliar aislada desde la distribución hasta la estructura. Para ello se abordará primero la recopilación y gestión datos, posteriormente un procedimiento de sintaxis espacial y por último la definición de los elementos que configuran la vivienda.

## **Key Words**

Architecture, automation, parametric design, spatial organization, customization

## **Abstract**

Architecture, analyzed as an industry, presents a craftsmanship production model that makes it vulnerable, due to its low productivity, to the progressive liberalization of the profession and a high supply that does not stop increasing. One of the carried-out researches aiming to increase productivity is based on the application of automatic process to the exercise of architecture.

Since the eighteenth century to present days many architects have tried to establish design methodologies capable of automate the design process, are famous forays into this field J.N.L.Durand , Le Corbusier, Buckminster Fuller, Juhani Pallasmaa and Christopher Alexander. In the last three decades experimental computer models have been developed. Allowing an independent design of any type of building , and high levels of customization by consumers being possible.

This academic work describes the development process, from parametric design tools, an automated system capable of producing , from certain variable inputs, a design of a detached house from distribution to structure. First data collection and management will be done, then a process of spatial syntax and lastly the definition of elements that make up the housing.

## **Paraules clau**

Arquitectura, automatització, disseny paramètric, organització espacial, customització.

## **Resum**

L'arquitectura, analitzada com a indústria, presenta un model productiu artesanal que la fa vulnerable, per la seva baixa productivitat, a una progressiva liberalització de la professió y a una oferta cada vegada major. Una de les vies d'investigació per a l'augment de la productivitat es basa en l'aplicació de processos d'automatització a l'exercici de l'arquitectura.

Des del segle XVIII fins l'actualitat nombrosos arquitectes han tractat d'establir metodologies de disseny capaces d'automatitzar el procés de disseny, son cèlebres les incursions en aquest camp de J.N.L. Durand, Le Corbusier, Buckminster Fuller, Juhani Pallasmaa y Christopher Alexander. En les últimes tres dècades s'han desenvolupat experimentalment models informàtics amb capacitat de projectar independentment qualsevol tipus d'edifici, permetent elevats nivells de customització per part del consumidor.

Aquest treball descriu el procés de desenvolupament, a partir d'eines de disseny paramètric, d'un sistema automàtic capaç de projectar, a partir d'uns determinats inputs variables, un habitatge unifamiliar aïllat des de la distribució fins l'estructura. Per a això s'abordarà primer la recopilació i gestió de dades, posteriorment un procediment de sintaxis espacial y per últim la definició dels elements que configuren l'habitatge.



# ÍNDICE

1. Introducción	
<i>Crisis de la arquitectura como industria</i> .....	10
2. Referentes teóricos	
<i>Racionalización y sistematización del diseño arquitectónico</i> .....	14
<i>Sistemas automáticos complejos. Customización en masa</i> .....	19
3. Objetivos del trabajo	
<i>Hacia una arquitectura programada</i> .....	25
4. Estado técnico de la cuestión	
<i>Metodologías para la organización espacial</i> .....	27
5. Estrategia	
<i>Secuencia para el desarrollo del sistema</i> .....	31
6. Metodología	
<i>Obtención de parámetros iniciales</i> .....	34
<i>Gestión de inputs</i> .....	38
<i>Organización espacial</i> .....	42
<i>Definición</i> .....	54
7. Resultados	
<i>Evaluación del sistema</i> .....	67
8. Conclusiones	
<i>Limitaciones y posibles mejoras del sistema</i> .....	71
<i>Cierre, procedimiento vs. objeto</i> .....	75
9. Referencias	
<i>Bibliografía</i> .....	78
<i>Créditos de las figuras</i> .....	81



## **1.INTRODUCCIÓN**



Fig 1.1.

1. BALTÁ, Joan. *El arquitecto como artesano de lo cotidiano: Reflexiones de campo entre etnometodología y arquitectura*. 2013. International Workshop COAC Barcelona 2013.

Fig 1.1. Portada del número 168/169 de la revista El Croquis.

## **Crisis de la arquitectura como industria**

El ejercicio de la arquitectura, desde el punto de vista industrial, sigue desarrollándose de manera artesanal por no producirse de forma seriada o simultánea, y por tener que realizarse mediante el encargo previo. En base a esta consideración podemos afirmar que el modelo productivo que sigue la arquitectura como industria es, en muchos aspectos, muy similar al modelo productivo dominante en la sociedad europea de los siglos XVI y XVII.

Previamente a la revolución industrial, comenzaron los primeros esbozos de los procesos de producción basados en la división del trabajo, los artesanos trabajaban para un contratista que les encargaba la fabricación de los productos deseados. Ante la necesidad del contratista de vender más productos, se logra aumentar la eficiencia de la producción artesanal mediante la distribución de tareas entre varias de acuerdo con las habilidades de cada uno. Este es el momento en el que se encuentra la industria arquitectónica actual.

Todavía se venera dentro de la profesión el icono del “arquitecto artesano” (Baltá, 2013)<sup>1</sup>, aparente artífice del proyecto en su totalidad, desde el concepto hasta el detalle. Muchas publicaciones, especialmente monografías de arquitectos como El Croquis o AV Monografías, favorecen la percepción errónea consistente en que el trabajo de un equipo de arquitectos es en realidad obra de un único

arquitecto, gerente de la sociedad que lleva su nombre.

A finales del siglo XX, en pleno auge del regionalismo crítico <sup>1</sup> (Frampton, 1992), movimiento basado en la oposición al fenómeno de la internacionalización arquitectónica, es cuando la figura del “arquitecto artesano” adquiere una mayor relevancia mediática. Prueba de ello es que muchos de los laureados con el premio Pritzker de arquitectura en esta época son asumibles al modelo del “arquitecto artesano” como Luis Barragán (1980), Álvaro Siza (1992), o Glenn Murcutt (2002).

Glenn Murcutt es un arquitecto londinense que ha desarrollado la mayor parte de su obra en Australia. Su reconocimiento, además de por la calidad de su obra, viene motivado por tratarse de un arquitecto que realiza en solitario todos sus proyectos en todas sus fases. Así queda reflejado en el acta del jurado del premio Pritzker que recibió en 2002:

Glenn Murcutt es un modernista, naturalista, ecologista, humanista, economista y ecologista que abarca todas estas cualidades en su práctica como arquitecto que trabaja en soledad desde concepto a la ejecución de sus proyectos en su Australia natal. (...) En general, evita grandes proyectos que requieran expandir su práctica, y renunciar a la atención personal a los detalles que puede dar a cada uno de los proyectos si estos son menores. *Acta del jurado del premio Pritzker (2002)* <sup>2</sup>

Sin embargo, este modelo tiene severas dificultades para reivindicar su competitividad en el mercado inmobiliario, especialmente por los tiempos cada

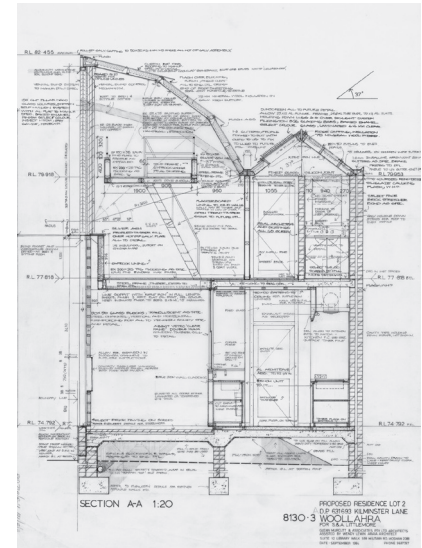


Fig 1.2

1. FRAMPTON, Kenneth. (1992) *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili. p.318

2. THE PRITZKER ARCHITECTURE PRIZE, [Web en línea]. <<http://www.pritzkerprize.com/2002/jury>> [Consulta: jueves, 27 de julio de 2016]

Fig 1.2. Sección constructiva a mano de la Casa Littlemore (Sydney 1984-1986) de Glenn Murcutt.

vez más cortos que requiere el sector privado para la elaboración del proyecto. Por ello, salvo en casos aislados como el anteriormente mencionado, el trabajo suele dividirse entre los miembros de un equipo que trabajan simultáneamente en el mismo proyecto, tal y como sugiere Rafael Moneo:

Hoy, la visión del arquitecto artesano está en trance de desaparecer, aunque una actividad como la nuestra siempre tendrá sentido. <sup>1</sup>

En España, con la ley 7/1997 de medidas liberalizadoras en materia de suelo y de Colegios profesionales, quedaron abolidos los honorarios orientativos fijados por los colegios de arquitectos. Dicha abolición conduce a la liberalización de un sector cuya materia prima principal es la mano de obra de sus empleados, por lo que la rentabilidad del producto quedará a partir de entonces más condicionada que nunca a la rápida elaboración del proyecto.

Una oferta cada vez mayor y con precios más agresivos, sumada a la persistencia un modelo productivo artesanal, ha conducido tanto al descenso en la calidad de los trabajos por su rápida elaboración en periodos de alta demanda, como a la desaparición de muchas empresas o la precarización de las condiciones laborales de los trabajadores en periodos de descenso de la demanda.

Frente a unos factores externos atribuibles a la economía de mercado y la tendencia a una sociedad cada vez más liberal, parece más pertinente que nunca investigar sobre modelos productivos más eficientes que permitan lograr un producto de mayor calidad en un tiempo más reducido y por lo tanto a un coste menor.

1. PAJARES, Eva. (2 de mayo de 2012) *Entrevista a Rafael Moneo* [La Razón]. Recuperado de <[http://www.larazon.es/historico/3067-el-arquitecto-artesano-esta-desapareciendo-MLLA\\_RA-ZON\\_456593#.Tt1OARctcTsCYj](http://www.larazon.es/historico/3067-el-arquitecto-artesano-esta-desapareciendo-MLLA_RA-ZON_456593#.Tt1OARctcTsCYj)>

## **2. REFERENTES TEÓRICOS**

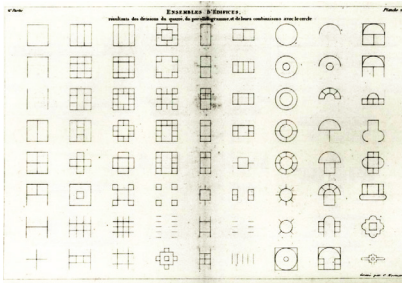


Fig 2.1

## Racionalización y sistematización del diseño arquitectónico

Una de las vías que conduce a la economía de recursos, tanto en la elaboración de proyectos como en su ejecución, es la de la racionalización o sistematización de ambos procesos. La racionalización/estandarización del diseño genera unas condiciones favorables a la industrialización por lo que, desde la revolución industrial, este ha sido un campo recurrente en la investigación de muchos arquitectos especialmente entre los años veinte y sesenta del pasado siglo XX.

La historia de la arquitectura moderna se caracteriza por una tensión continua entre racionalismo y empirismo, la estandarización y la customización. Los distintos movimientos arquitectónicos han venido posicionándose porcentualmente entre un extremo y otro. Generalmente, ante el fracaso de un posicionamiento radical cercano a uno de estos dos extremos se sucedía un movimiento arquitectónico que priorizaba el contrario, así pues, en el último siglo se han venido intercalando movimientos como pintoresquismo, existencialismo, fenomenología y estructuralismo entre muchas otras corrientes.

Jean-Nicolas-Louis Durand, arquitecto, profesor y teórico en la escuela de trabajos públicos, puede ser considerado como el pionero en la ideación de un sistema racional explícito generador de arquitectura. En *Précis des leçons d'architecture données à l'école polytechnique* (1805), Durand recopila de la historia de la arquitectura

Fig 2.1. *Ensembles d'Edifices*, sistema de ensamblaje de piezas propuesto Jean N. Louis Durand en su obra *Recueil et parallèle des édifices*

motivos o partes que se repiten en los edificios históricos, catalogándolos y transformándolos en arquetipos de los que servirse para la composición de nuevos proyectos mediante un sistema de agregación ordenada.

Desde Jean Louis Durand, muchos arquitectos, especialmente tras la I Guerra Mundial, han venido desarrollando sistemas de producción en serie, ya sea a nivel constructivo como de diseño. son célebres tanto los prototipos Domino, Monol y Citróhan del arquitecto franco-suizo Le Corbusier, como las viviendas modulares diseñadas por Walter Gropius para la empresa Hirsch.

En esta época de entreguerras la arquitectura se dirige hacia su completa industrialización debido a la convergencia de dos factores: la consolidación de la producción industrial en serie, y el auge del racionalismo como corriente de pensamiento. El propio Le Corbusier en este sentido escribía:

Si se arrancan del corazón y del espíritu los conceptos inmóviles de la casa y se enfoca la cuestión desde un punto de vista crítico y objetivo, se llegará a la casa-herramienta, a la casa accesible a todos, sana, incomparablemente más sana que la antigua (moralmente también) y bella, con la estética de las herramientas de trabajo que acompañan nuestra experiencia. <sup>1</sup>

El intento por parte de la empresa aeronáutica Voisin de introducirse después de la guerra en el mercado francés de la vivienda, con unas casas de madera producidas en una cadena de montaje, fue aclamado con entusiasmo por Le Corbusier en el segundo número de L'Esprit Nouveau (Frampton, 1992).

1.LE CORBUSIER (1923). Hacia una arquitectura. Barcelona, Apóstrofe, 1978. p.33.

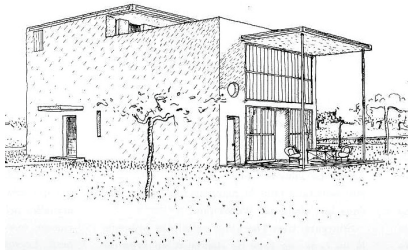


Fig 2.2

Posteriormente el arquitecto suizo desarrollaría el modelo de la casa *Dom-Inó*, ideada para que su construcción pudiese ser ejecutada rápidamente por trabajadores poco cualificados. De ese modelo derivarían la casa *Citrohan* y la *Ville Contemporaine* modelos de vivienda para ser producidos en serie y vendidos en masa.

Le Corbusier analiza el problema de la vivienda de manera objetiva, introduciendo grandes cambios que afectarían a la manera de diseñar, de ejecutar e incluso de vivir la vivienda. En la misma obra anteriormente citada, Le Corbusier aboga por una radical transformación en la metodología del arquitecto: una casa objetiva y racionalmente concebida permitiría que éste en vez de producir un modelo de vivienda cada vez que se le realizase un encargo, pudiese producir modelos de vivienda capaces de ajustarse a millones de casos, tal y como ocurre con la industria automovilística o la aeronáutica. De esta manera se podrían establecer normas que permitirían mediante su selección, transformación y sustitución, la evolución de la arquitectura como ciencia o técnica.

Con el objetivo de racionalizar el proceso constructivo de la vivienda, el concepto de arquitectura modular continua desarrollándose durante la segunda mitad del siglo XX principalmente en la vivienda. Entre otros muchos ejemplos, destacan las casas Dymaxion de Buckminster Fuller. Este modelo desarrollado por Buckminster Fuller, inspirado como Le Corbusier en la industria automovilística, fue evolucionando durante dos décadas con diferentes prototipos, permitiéndole incorporar en ellos mejoras tanto en aspectos constructivos, como bioclimáticos y de funcionamiento.

Fig 2.2. Casa Citrohan (1922) de Le Corbusier presentada en el salón d'Automne.



El modelo Dymaxion de vivienda aplica en sus sucesivas iteraciones la capacidad de mejorar un único modelo replicable en masa, en base a unos parámetros cuantificables, capacidad de difícil aplicación en un modelo productivo artesanal.

Todas estas aproximaciones a una metodología de proyecto sistemática han pretendido, además de dar consistencia al proceso de diseño dotándolo de cualidades objetivas y cuantificables, solventar la pérdida de competitividad de un sector como la arquitectura frente a otras profesiones que han sido capaces de incorporar la automatización de procesos a su metodología de trabajo.

La sistematización de la arquitectura promete, al arquitecto que consiga desarrollarla con éxito, la capacidad de aumentar su producción a cotas mucho más elevadas que el resto de sus competidores. Este ha sido en muchos casos el ansiado objetivo de los arquitectos que hemos citado como ejemplo y otros muchos que no aparecen en este texto. El propio Le Corbusier deseaba implementar sus modelos replicables y darles salida en el mercado para obtener el soporte económico necesario que le permitiría desarrollar su verdadera vocación: la pintura.

Sin embargo, todos estos relatos convergen en un mismo punto: su fracaso a la hora de introducirse con éxito en el mercado. Le Corbusier, con gran atino, condiciona el éxito de su casa-herramienta a la desaparición de “los conceptos inmóviles de la casa” imperantes en la sociedad, anticipando la resistencia social que tendrían los modelos de vivienda diseñados para ser producidos en masa.

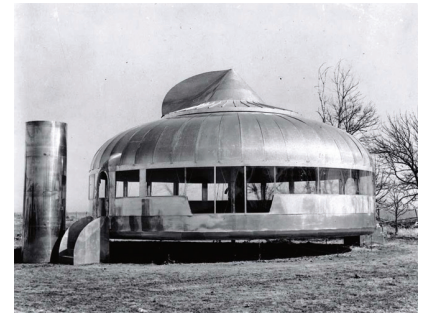


Fig 2.3

Fig 2.3. Dymaxion House en Wichita (1945) de Buckminster Fuller



Fig 2.4

Aunque la repetición es un recurso que se ha introducido con relativo éxito en promociones inmobiliarias con un número limitado de viviendas, no ha sido igualmente aplicable a la producción y distribución en masa de viviendas industrializadas en el mercado europeo, fruto de una fatal concomitancia de factores sociales, logísticos y de mercado.

La necesidad colectiva de habitar un espacio personalizado es uno de los factores más determinantes en el fracaso del movimiento moderno. El crítico de arquitectura Charles Jencks, pone fecha y hora al fin del movimiento moderno, refiriéndose al instante exacto en el que fue demolido del premiado conjunto de viviendas Pruitt-Igoe en Saint Louis, Missouri, del arquitecto Minoru Yamasaki. Este bloque de edificios se cita como ejemplo de las intenciones del movimiento moderno, que mediante modelos repetitivos y planificados, discurren contrarias al desarrollo social del mundo real <sup>1</sup>. Una combinación de malas decisiones arquitectónicas y políticas llevó a su demolición a las 15:00 horas del 16 de marzo de 1972.

En paralelo al ocaso del movimiento moderno, comienzan a desaparecer del escenario de la vanguardia arquitectónica proyectos basados en la repetición de módulos racionalmente diseñados, se deja de creer en un modelo de vivienda racional e industrializada producida en masa. Será necesario a partir de entonces incurrir en modelos racionales más complejos y abiertos que introduzcan la customización en el proceso de diseño. Modelos de vivienda que, pese tener cierto grado de automatización en su diseño, surjan de la negociación entre las necesidades del cliente y los conocimientos técnicos del arquitecto.

1. JENCKS Charles, (1986) *El lenguaje de la arquitectura moderna*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili

Fig 2.4. Demolición por parte de agencias gubernamentales del conjunto de viviendas Pruitt-Igoe en Saint Louis, Missouri, del arquitecto Minoru Yamasaki, en 1972.

### Sistemas automáticos complejos. Customización en masa

A partir de los años setenta, con la crisis del movimiento moderno, el camino hacia la automatización del proceso de diseño adquiere dos derivas diferentes: una primera continuista basada en el paradigma de la vivienda industrializada, y una segunda que avanza hacia modelos complejos no necesariamente ligados a la producción en masa.

La repetición ha constituido el principal rasgo definitorio de la relación entre arquitectura e industria, sin embargo, este rasgo puede considerarse también su principal estigma. Por ello, se evoluciona desde una visión enfocada hacia el diseño de prototipos industrializados, a otra más contemporánea basada en la utilización versátil de componentes de catálogo. Al enfoque universal racionalista se añade una nueva sensibilidad hacia lo subjetivo y diferencial. Felipe Pich-Aguilera aborda este asunto de la siguiente manera:

Una mirada atenta al sector de la construcción industrial muestra la gran evolución que éste ha experimentado para adecuarse a necesidades específicas. La industria ha desarrollado aquí una serie de sistemas estándar que permiten una gran versatilidad y una gran rapidez de ejecución además de costes ajustados. <sup>1</sup>

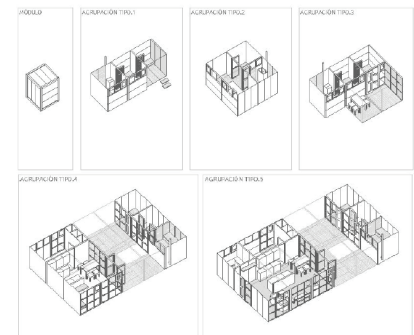


Fig 2.5

1. PICH AGUILERA, Felipe. *El problema de la vivienda, una asignatura pendiente*. Quaderns 218, 1997

Fig 2.5. Sistema Moduli (1973)  
Kristian Gullichsen + Juhani Pallasmaa.

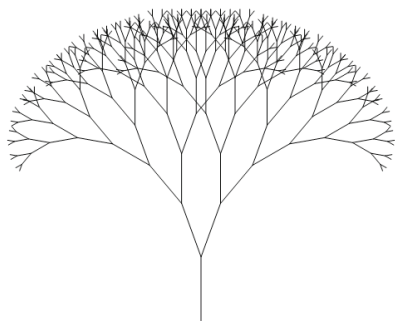


Fig 2.6

1. SALINGAROS, Nikos (2014). *Charles Jencks y el Nuevo paradigma en arquitectura*. Del libro: *Antiarquitectura y deconstrucción: el triunfo del nihilismo*. Madrid, Mairca.

2. ALEXANDER, Christopher. *The layout of individual houses*. Publicado en *The Production of Houses*

Fig 2.6. Fractal arbóreo sencillo fruto de la iteración de una misma orden: en el extremo de una línea de longitud  $l$  se disponen dos líneas de longitud  $l/k$  formando un ángulo a respecto al eje de la línea.

En base a este planteamiento renovado surgen modelos como el pionero Sistema Modulli (1968-1973) de Juhani Pallasmaa y Kristian Gullischen o los más actuales ejemplos nacionales como las Casas AH (1994-1996) de Ábalos y Herreros o las M'House (1998) de Actar Arquitectura.

Otra corriente surge y puede ser entendida a partir de la aplicación de nuevas vías de investigación científicas a la arquitectura, así pues emplea recursos como la teoría de la complejidad, sistemas organizables, fractales, dinámicas no lineales, surgimiento y similaridad. Destaca en este campo el arquitecto austríaco Christopher Alexander, autor de *A Pattern Language: Towns, Buildings, Constructio* en el que desarrolla un sistema práctico de arquitectura mediante gramática generativa, un código o guión (script) capaz de generar infinitas variables. Alexander goza de un gran reconocimiento en el campo de las ciencias de la computación, especialmente por su obra *La naturaleza del orden*, en la que además de aplicar la teoría de la complejidad a la arquitectura, desarrolla conceptos fundamentales dentro de la misma teoría (Salingaros. 2014).<sup>1</sup>

Christopher Alexander además de trabajar en aspectos generales de la generación de sistemas funcionales aplicados a la arquitectura presta una especial atención al problema de la vivienda, escribiendo numerosos artículos a ese respecto:

Es fundamental en el proceso de producción de casas -quizá lo más fundamental de todo- el principio de que las familias diseñan sus casas ellas mismas.<sup>2</sup>

Mecanismos generadores de formas complejas como el crecimiento fractal, el surgimiento, la adaptación y la auto-organización pueden ser aplicados a la arquitectura, permitiendo generar automáticamente modelos adaptativos fieles a unos principios o patrones axiomáticos, esto abre la posibilidad a la generación de infinitos modelos diferentes en base a un diseño abierto a factores externos como las necesidades del cliente, la climatología, la topografía entre otros.

Es un proceso abierto. “Abierto” en el sentido de ofrecer de manera continua la interacción con las diversas esferas de la “realidad”; “abierto” también en el sentido de ofrecer diálogo y discusión continuos entre los diversos participantes del proceso. Asimismo y para terminar, “abierto” en el sentido de que el resultado final es impredecible y se encuentra al final de un único viaje. <sup>1</sup>

Todos los contextos tienen una cierta parte de materia informativa procesable codificable, información que puede ser directamente traducida en arquitectura mediante algunos de los procesos anteriormente señalados. Esta transformación permitirá, por primera vez, que el cliente pueda customizar su propia vivienda, probar distintas opciones (fieles a los principios definidos por el arquitecto) y ajustarlas para alcanzar el modelo que mejor se adapte a sus necesidades, siendo al mismo tiempo eficiente para el resto de condicionantes propios de la arquitectura.

Hemos traspasado el umbral de una revolución del diseño, en el que las reglas generativas pueden ser programadas para evolucionar electrónicamente y luego fabricar el producto directamente mediante las herramientas de fabricación

1. ALEXANDER, Christopher. *Features of the practice*. Publicado en a+u.

Fig 2.6. Fractal arbóreo sencillo fruto de la iteración de una misma orden: en el extremo de una línea de longitud  $l$  se disponen dos líneas de longitud  $l/k$  formando un ángulo  $\alpha$  respecto al eje de la línea.



Fig 2.7

digital (impresoras 3D, máquinas de corte láser, CNC...). Este nuevo escenario permite la diferenciación de unas piezas entre otras, de manera que la particularidad de cada solución arquitectónica no penalice su viabilidad económica o constructivamente respecto al modelo de arquitectura generada in-situ o la arquitectura industrializada.

Joseph Pine, escritor y consultor empresarial, define la customización en masa como la producción en masa de bienes y servicios individualmente customizados. Esto ofrece la promesa de un aumento enorme en la variedad y customización de los productos de consumo sin correspondiente un aumento del coste. En las últimas décadas muchos servicios y bienes de consumo han sido afectados por la customización en masa, sin embargo, este fenómeno se refleja de manera mucho más tímida en el mercado inmobiliario.

En este contexto social, tecnológico y productivo, un modelo productivo basado en la customización en masa de viviendas es más posible que nunca. En los últimos 15 años se han desarrollado las tecnologías necesarias para la generación de diseños con un elevado nivel de customización: diseño paramétrico, fabricación digital, internet, visualización, simulación y análisis <sup>1</sup> (Kolarevic. 2014). Destacan los trabajos en este campo como *Objetiles* 1997 de Bernard Cache, *Embryological House* 1998 de Greg Lynn y la *mTable* 2002 de Gramazio and Kohler.

1. KOLAREVIC, Branco (2014). *From mass customisation to design "Democratisation"*. Publicado en A+D. Diciembre 2015

Fig 2.7. m-Table (2002) de Gramazio and Kohler, diseño customizable que permite modificar sus dimensiones al mismo tiempo que cambiar sus perforaciones.

Este trabajo tratará de profundizar en esta cuestión, explorar esta vía que permitirá al arquitecto no solo aumentar su productividad mediante la automatización del diseño (programado en vez de dibujado), sino también

adaptarse a condicionantes cuantificables, pero difícilmente procesables por su complejidad (radiación solar, termodinámica, comportamiento estructural), y permitir la intervención directa del cliente en el diseño del modelo.

### **3. OBJETIVO DEL TRABAJO**



## **Hacia una arquitectura programada**

Habiendo planteado las potencialidades que tienen las herramientas informáticas para generar un sistema automático generador de viviendas altamente customizables, el objetivo de este trabajo será aproximarse lo máximo posible al objetivo final que es la implementación de dicho sistema.

Dada su complejidad, centraremos la atención en el procedimiento de sintaxis espacial (NOURIAN, REZVANI, y SARIYILDIZ 2013), fase primaria de dicho sistema. La organización espacial condicionará el resto de fases, por lo tanto del éxito de sus resultados dependerá la posterior fase de definición de componentes (modelo 3D de la vivienda) y la extracción de resultados.

Por la extensión de este trabajo y por el tiempo disponible, no se priorizará la fase de definición de componentes, y se postergará la extracción de resultados a investigaciones posteriores si los resultados de esta presente son satisfactorios. Para evaluar dichos resultados, bastará con disponer de plantas y modelo 3D básico de la vivienda para comprobar si funcionalmente el resultado es correcto. Consideraremos que funcionalmente el resultado es aceptable si el modelo permite tanto la perfecta comunicación entre sus estancias como su construcción mediante una estructura primaria básica compuesta por pilares, vigas, forjados y cerramientos.

## **4. ESTADO TÉCNICO DE LA CUESTIÓN**

## Metodologías para la organización espacial

El método de diseño arquitectónico consiste en un método manual de prueba-error basado en una única opción, todas las fases (organización espacial, adaptación a los condicionantes externos y definición) se realizan casi simultáneamente, repitiendo cíclicamente el proceso cuando se pretende modificar alguna de las fases.

Una de las ventajas que nos aporta un método automático de diseño de viviendas mediante programación es la posibilidad de contemplar datos complejos a la hora de definir el proyecto. Esto genera simultáneamente multitud de alternativas de un mismo sistema de relaciones espaciales, para mediante la selección y ajuste de ellas escoger el mejor resultado conforme a las variables que se deseen tener en cuenta. A este proceso de filtrado y ajuste se le define como optimización, proceso que obtiene de todas las variables aquella que mejores resultados proporcione frente a agentes externos, siempre y cuando que sus efectos sean cuantificables. La optimización, en nuestro contexto, es el equivalente digital a la fase de adaptación analógica.

La optimización de resultados es asumible por cualquier algoritmo genético implementado en el programa que vayamos a utilizar para generar el código; bastaría utilizar Galapagos ® si utilizamos Grasshopper 3D ® para desarrollar

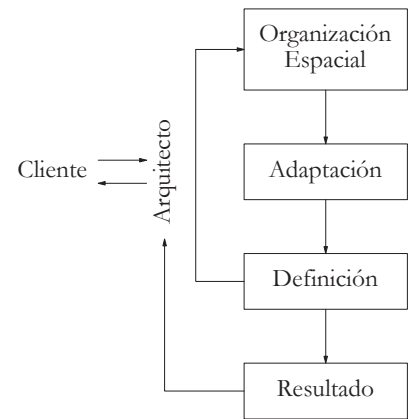


Fig 4.1

Fig 4.1. Diagrama del método analógico de diseño arquitectónico.

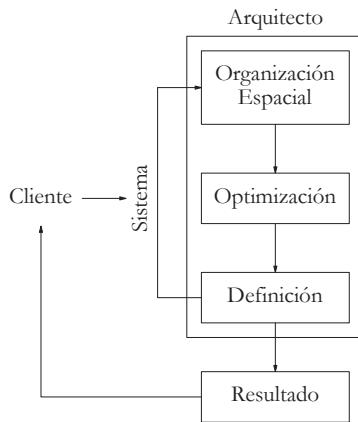


Fig 4.2

el sistema. Respecto a la definición de los elementos de la vivienda, se puede realizar fácilmente, o bien generando los modelos 3D con un código de dificultad moderada, o bien exportando los resultados a cualquier herramienta BIM como Revit Architecture ® o ArchiCAD ®. Por lo tanto, el principal problema de la cuestión no reside tanto en la optimización de resultados o en la definición automática de los elementos de la vivienda, sino en la generación automática de la planta de la vivienda, o lo que es lo mismo, en su distribución espacial.

Desde la década de los setenta se ha venido utilizando la programación aplicada al diseño. Motivados por los resultados prometedores de un sistema automático de diseño, muchos investigadores han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de procedimientos de generación automática de plantas aplicados a la arquitectura. Para ello se han utilizado diversos métodos de síntesis espacial:

- Piezas planas con rectángulos conectados (March and Matela, 1974)
- Dissección de rectángulos (Bloch, 1979; Earl, 1977)
- Dimensiones proxémicas (Shapira y Frew, 1974)
- Empaquetado de rectángulos (Combes, 1976)
- Teoría gráfica (Baybars, 1982; Roth, 1985)
- Sistemas arbóreos (Galle, 1986)
- Partición espacial (Kovacs, 1991)
- Heurística (Medjoub y Yannou, 2001)
- Técnicas evolutivas (Viriakis, 2003)

Fig 4.2. Diagrama del método digital de diseño arquitectónico.

Uno de los sistemas más actuales y que más interés puede generar en la materia es el desarrollado por Eugenio Rodrigues en su tesis doctoral: *Automated floor plan design, generation, simulation and optimization*. Utiliza técnicas evolutivas en dos fases: una primera para generar plantas coherentes de uno o varios niveles (con correspondencia entre ellos) y una segunda en la que logra optimizar el resultado frente a eficiencia energética.

En la actualidad, con la aparición de los entornos de programación ligados a programas de diseño CAD y BIM (Grasshopper 3D ® para Rhinoceros 3D ®, Dynamo ® para Revit Architecture ®), existen diversas herramientas que integran algunas de estas estrategias para la generación automática de diagramas de distribuciones espaciales, no existe, sin embargo, no existe ninguna herramienta capaz de transformar un programa de necesidades y unas relaciones espaciales en una planta de vivienda.

Entre estas herramientas destaca Space Syntax for Grasshopper ® desarrollado por los ingenieros Pirouz Nourian, Samaneh Rezvani y Sevil Sariyildiz, de la Universidad de Delft. Basada en el trabajo de March y Steadman, esta herramienta que da solución al problema de la localización espacial ininterrumpida entre componentes.

Por lo tanto la cuestión que aborda este trabajo cuenta con numerosos antecedentes en el terreno de la investigación pero, paradójicamente, el nivel de implementación en la sociedad es muy reducido. La aparición de herramientas de diseño paramétricas y el esfuerzo de algunos científicos por acercar la cuestión a arquitectos y diseñadores permite, a día de hoy, trabajar en la materia



Fig 4.3

Fig 4.3. Plantas de vivienda unifamiliar obtenidas por Eugenio Rodrigues

## **5. ESTRATEGIA**

## Secuencia para el desarrollo del sistema

Para el desarrollo del sistema emplearemos herramientas CAD que faciliten la gestión de la información del proyecto una vez desarrollado el modelo. Rhinoceros 3D ® es una herramienta informática para modelado en tres dimensiones. Es un software de diseño asistido por ordenador (CAD) creado por Robert McNeel & Associates. Uno de sus componentes es Grasshopper 3D ®, un lenguaje de programación visual desarrollado por David Rutten, el hecho de que el lenguaje sea visual facilita su manejo tanto a arquitectos como a ingenieros que a priori no estén familiarizados con la programación.

Una de las características del código informático es que tiene carácter lineal. Un retroceso en la secuencia no controlado provoca bugs que inhabilitan el programa. Esta circunstancia inevitablemente se plasma en la propia estrategia de trabajo, en consecuencia la secuencia con la que se desarrollará el proyecto también tendrá carácter lineal, y abarcará desde la determinación de unos parámetros iniciales o axiomáticos en el diseño de la vivienda hasta la definición del proyecto.

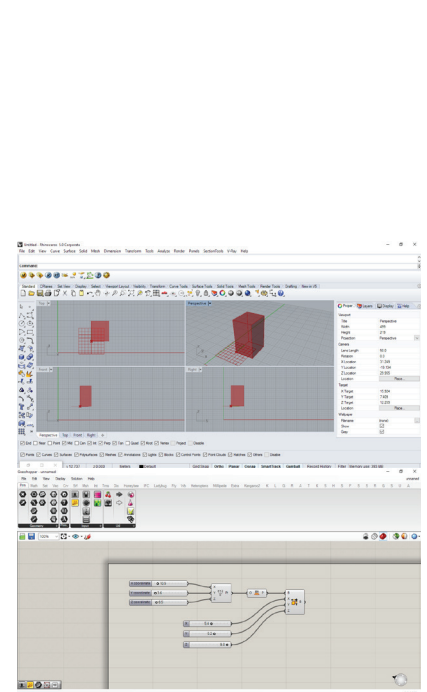


Fig 5.1

Fig 5.1. Entorno de Rhinoceros y Grasshopper 3D.

Fig 5.2. Diagrama de la secuencia de trabajo.

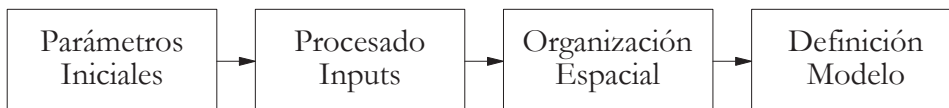


Fig 5.2

En primer lugar, determinaremos cuales son los parámetros iniciales, componentes fijos del programa que deberán respetar en todos los casos las soluciones que vayamos a adoptar. A continuación, estableceremos los inputs a introducir en cada tentativa, consideramos como inputs los parámetros que son variables, liberados para adaptarse a la necesidades de cada caso. La información recopilada y procesada de estas dos primeras fases será la base sobre la cual realizar la organización espacial que nos lleve a obtener una planta sencilla. Por último a partir de dicha planta desarrollaremos algunos elementos que identifiquen la tipología como una vivienda, y nos ayuden a evaluar el correcto funcionamiento del programa.

Para abordar el proyecto con una tipología de edificio relativamente sencilla, escogeremos la tipología de vivienda unifamiliar aislada. Esta elección se debe a que esta vivienda se configura con un programa relativamente sencillo y que no tiene condicionantes morfológicos exteriores muy rígidos. De lograr parametrizar este tipo de vivienda en posteriores investigaciones se podrá abordar otras tipologías más complejas y con restricciones morfológicas más severas.



## **6.METODOLOGÍA**

## Obtención de parámetros iniciales

Si hay un libro que trate de recopilar parámetros que determinen la buena funcionalidad del diseño de una vivienda y que haya logrado una amplia difusión este es “Arte de Proyectar en Arquitectura” de Ernst Neufert. Es pues un manual de proyectos de construcción que reúne de forma sistemática los fundamentos, las normas y las prescripciones sobre recintos, edificios, exigencias de programa, relaciones espaciales, dimensiones de edificios, locales, estancias, instalaciones y utensilios con el ser humano como medida y objetivo.

De dicho manual extraeremos en primer lugar, cuales son las características generales de una vivienda unifamiliar aislada en lo que respecta a su parcela, superficie total orientativa y edificabilidad entre otros factores. Estos valores serán sustituidos por los condicionantes reales cuando se trate de aplicar el sistema a un caso real, apartado que se excede del objeto de este trabajo. En la tabla de la página posterior (fig 6.2) se pueden revisar dichos parámetros.

A partir de la escasa edificabilidad de esta tipología ( $<0,4m^2t/m^2s$ ) podemos comprobar que, entre todas las existentes, esta es la tipología de vivienda que menos depende en su formalización de la geometría de la parcela. Mientras que en un caso práctico esta condición sería necesariamente tenida en cuenta (respetando distancia a lindes), en este caso prescindiremos de esta restricción.

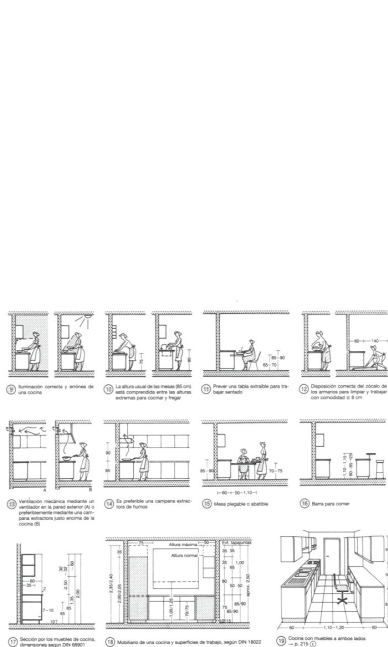


Fig 6.1.

Fig 6.1. Esquemas representativos con medidas orientativas para el correcto funcionamiento de una cocina.


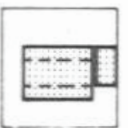
Tipo de vivienda con la correspondiente parcela		Vivienda unifamiliar aislada	
			
Acceso			
1	Frente mínimo de la parcela m	20	20
2	Profundidad mínima de la parcela m Profundidad deseable	22 (25)	20 (25)
3	Superficie mínima de la parcela m <sup>2</sup>	440 (500)	400 (500)
4	Superficie ocupada por el garaje o plaza de aparcamiento m <sup>2</sup>	-	-
5	Superficie del solar m <sup>2</sup> = superficie neta edificable (4 + 5)	440 (500)	400 (500)
6	Número usual de plantas	1	1, 1/2
7	Superficie construida media por vivienda m <sup>2</sup>	150	160
8	Edificabilidad de cálculo	0,34 (0,3)	0,4 (0,32)
9	Máxima edificabilidad (m <sup>2</sup> construidos/m <sup>2</sup> solar)** Máximo edificabilidad (m <sup>3</sup> construidos/m <sup>2</sup> solar)**	0,5 0,4	

Fig 6.2.

Fig 6.2. Tabla con características orientativas que definen la tipología de vivienda unifamiliar aislada.

Por otro lado, comprobamos como el número usual de plantas de esta tipología es  $n=1$ , cuestión que restará complejidad a la distribución en dos niveles. El diseño de una vivienda unifamiliar aislada en dos o más alturas exige correspondencia estructural entre los niveles, limitando por tanto dimensiones y posición de las estancias de una y otras plantas.

El siguiente parámetro invariable del que depende el correcto funcionamiento de la vivienda, son las dimensiones de las estancias. Estas deberán cumplir ambas direcciones con una longitud mínima  $l > l_{\min}$ , viniendo su relación determinada por el área de la estancia:  $l_2 = A/l_1$ . En la siguiente figura desglosamos las longitudes mínimas de cada una de las estancias:

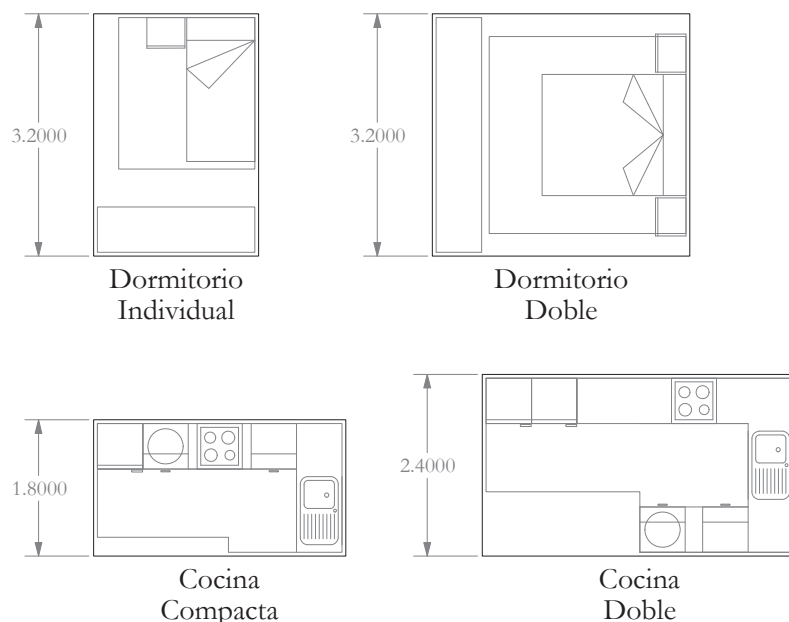


Fig 6.3. Dimensiones mínimas de cada uno de las estancias tipo. En color claro aparece el área inscribible de referencia según normativa.

Fig 6.3

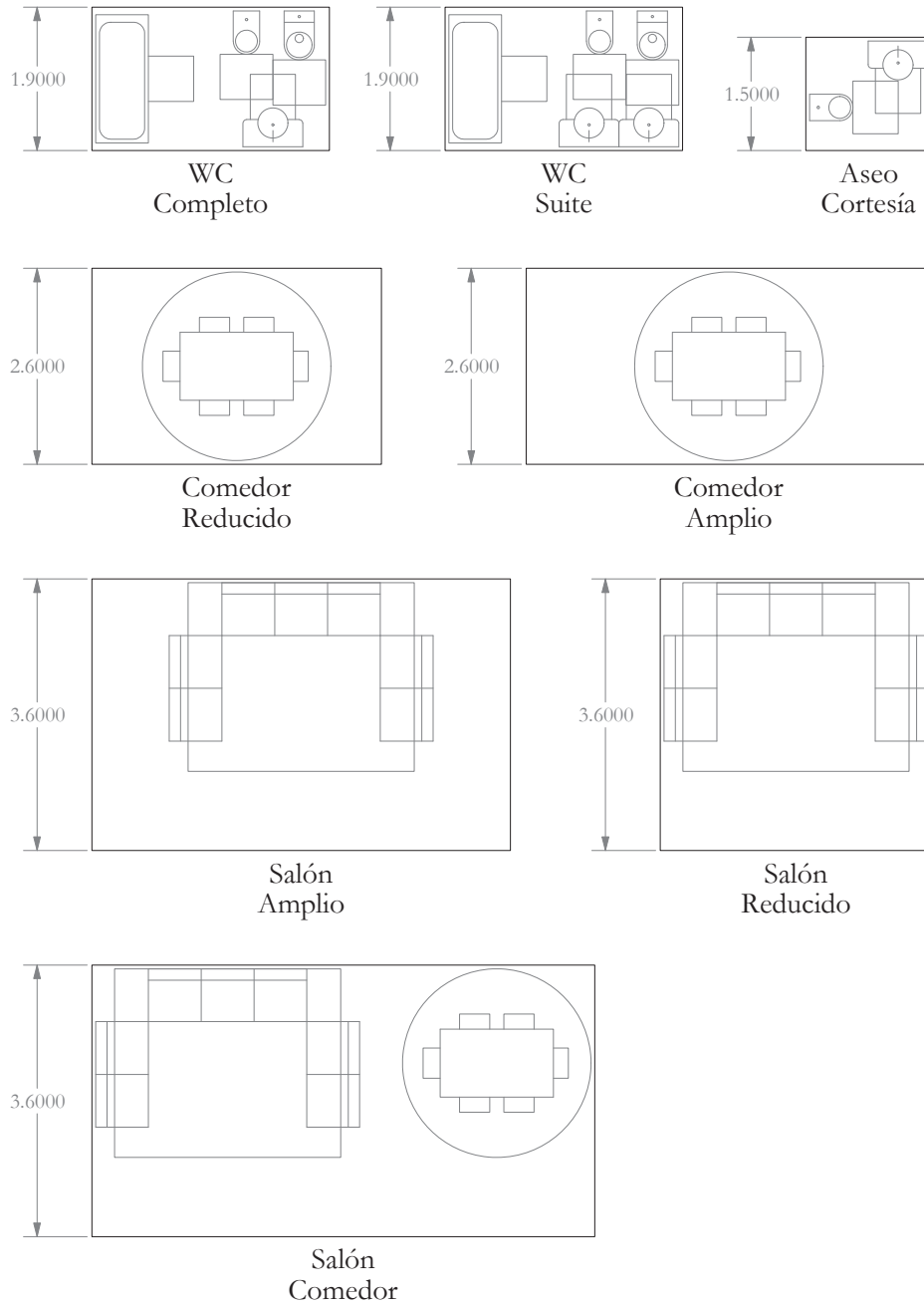


Fig 6.4

Fig 6.4. Dimensiones mínimas de cada uno de las estancias tipo. En color claro aparece el área inscribible de referencia según normativa.

## **Gestión de inputs**

Los parámetros que quedan liberados serán las estancias, sus relaciones y sus superficies. Estos son los parámetros que determinará el cliente, todos están parcialmente liberados a discreción del arquitecto, evitando así resultados absurdos y problemas funcionales, tal y como ocurriría en cualquier proyecto realizado de manera convencional.

Respecto a las estancias escogidas se puede escoger entre las siguientes, quedando limitadas también en número de la siguiente manera:

Salón amplio  $\rightarrow n \leq 1$

Salón reducido  $\rightarrow n \leq 1$

Salón-comedor  $\rightarrow n \leq 1$

Comedor amplio  $\rightarrow n \leq 1$

Comedor reducido  $\rightarrow n \leq 1$

Cocina compacta  $\rightarrow n \leq 1$

Cocina doble  $\rightarrow n \leq 1$

Dormitorio doble  $\rightarrow n \leq 2$

Dormitorio individual  $\rightarrow n \leq 3$

Aseo de cortesía  $\rightarrow n \leq 1$

WC completo  $\rightarrow n \leq 2$

WC tipo suite  $\rightarrow n \leq 1$

Cocina compacta  $\rightarrow n \leq 1$

La duplicidad de tipologías se produce por diversos motivos, principalmente cuando dentro de la misma tipología se producen variaciones en la longitud mínima  $l_{\min}$  por cuestiones funcionales (ej. cocina doble y cocina compacta), también cuando su ubicación dentro de la distribución queda condicionada a su tipo (ej. wc completo y wc suite), o bien por simplificar la elección mediante áreas orientativas (ej. salón amplio y salón reducido).

Existen, sin embargo, algunas estancias que aparecerán en todos los modelos, pudiendo presentar características fijas como el aseo o el recibidor, o variables como los pasillos cuyo área está condicionada al número de estancias que comunican:

Acceso cubierto  $\rightarrow n=1$

Recibidor  $\rightarrow n=1$

Pasillo de día  $\rightarrow n=1$

Pasillo de noche  $\rightarrow n=1$

El valor del área de cada estancia quedará limitado en un intervalo de valores máximo y mínimos según el criterio del arquitecto que propone el sistema. El área mínima será siempre estará relacionada con la longitud mínima, de manera que ninguno de los lados alcance un valor menor a  $l_{\min}$ , resultando la siguiente relación matemática:  $A_{\min} = l_{\min}^2$ . El área máxima la establecerá el arquitecto que defina el programa, no existe ningún criterio fijo que limite el área máxima

de una estancia en el cual basarse. Únicamente cuando se trate de dos tipos de estancia cuya única variación sea propiamente la superficie (ej. salón amplio y salón reducido) convendrá limitar como área máxima del de menor superficie el valor mínimo de área del mayor.

Por último, las relaciones entre estancias quedan definidas del siguiente modo:

	Salón amplio	Salón reducido	Comedor amplio	Comedor reducido	Salón-Comedor	Cocina doble	Cocina compacta	Dormitorio doble	Dormitorio individual	WC completo	Acceso	Aseo de cortesía	WC tipo suite	Recibidor	Pasillo de día	Pasillo de noche	
Salón amplio			1	1											1		Salón amplio
Salón reducido			1	1											1		Salón reducido
Comedor amplio	1	1				1	1								1		Comedor amplio
Comedor reducido	1	1					1								1		Comedor reducido
Salón-Comedor						1	1								1		Salón-Comedor
Cocina doble			1	1	1										1		Cocina doble
Cocina compacta			1	1	1										1		Cocina compacta
Dormitorio doble													1			1	Dormitorio doble
Dormitorio individual																1	Dormitorio individual
WC completo																1	WC completo
Acceso															1		Acceso
Aseo de cortesía															1		Aseo de cortesía
WC tipo suite								1									WC tipo suite
Recibidor						1					1	1			1	1	Recibidor
Pasillo de día	1	1	1	1	1	1	1								1	1	Pasillo de día
Pasillo de noche								1	1	1					1	1	Pasillo de noche

Fig 6.5. Tabla de relaciones entre estancias completada en sistema binario. 0 representa la no conexión mientras que 1 significa que se produce conexión entre estancias.

Fig 6.5



Como ocurre con las superficies estas conexiones estarán condicionadas por el criterio del arquitecto ya que de no producirse algunas de ellas, el sistema carecería de sentido o bien se incurriría en incumplimiento de normativa si se produjesen algunas otras (como la del wc con el salón). En cualquier caso las que aparecen aquí señaladas son las que se han considerado como óptimas para el correcto funcionamiento del sistema.

Estos datos se introducen en un documento Excel (.xlsx), esta información deberá ser trasladada para las próximas fases. Hasta este momento, los datos suministrados al modelo son los siguientes: tipo de estancia, área, número de estancias por tipo, longitud mínima y conexiones. A partir de este momento todo el proceso se desarrolla en Grasshopper 3D®.

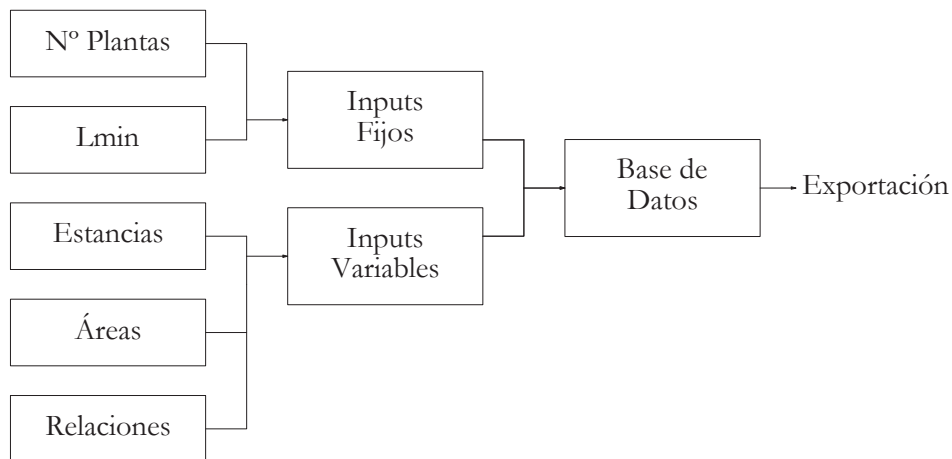


Fig 6.6

Fig 6.6. Esquema descriptivo del proceso.

## Organización espacial

Este apartado del proceso puede considerarse como dividido en dos fases: una primera más abstracta que aborda las relaciones espaciales entre las distintas estancias y una segunda más concreta que traduce dichas relaciones en un diagrama de planta.

Para la explicación del proceso será necesario apoyarnos ya en una de las infinitas variables que podrían aplicarse al sistema. Escogemos un ejemplo con cierta complejidad programática que nos permita explorar las capacidades del programa desde sus propios límites. Un resultado satisfactorio con este ejemplo demostraría la validez del sistema para programas más sencillos y con menor superficie.

	Unidades	Área
Salón amplio	1	20
Comedor amplio	1	14
Cocina doble	1	10
Dormitorio doble	1	11
Dormitorio individual	2	7
WC completo	1	6
Aseo de cortesía	1	3
WC tipo suite	1	6
Recibidor	1	6
Pasillo de día	1	8
Pasillo de noche	1	9
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>100</b>

Fig 6.7

Fig 6.7. Programa de la vivienda tomada como ejemplo.

En la primera fase, se llevará a cabo la gestión de los parámetros importados desde la hoja de cálculo, transformándolos en la información requerida por el algoritmo Space Syntax. Este algoritmo realizará la distribución esquemática de las distintas estancias sin que se produzca intersección entre ninguna de las conexiones.

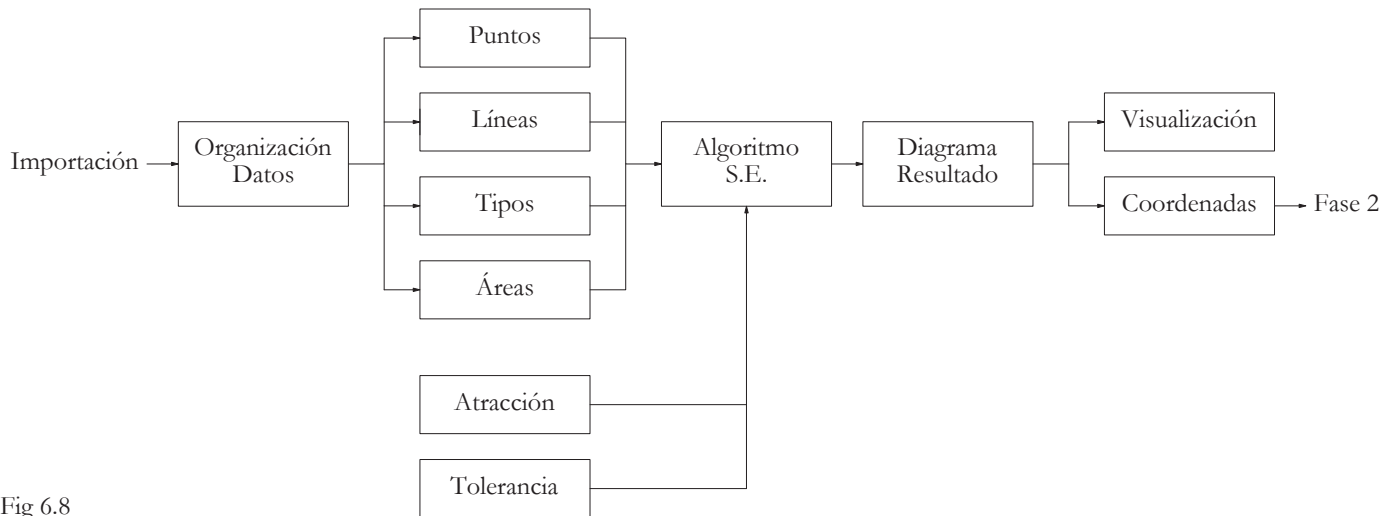


Fig 6.8

Space syntax define la configuración espacial en forma de diagrama de burbujas, diagrama que constituirá el primer eslabón de la cadena de procesos que llevará a la definición total de la vivienda.

El algoritmo necesitará una primera configuración aleatoria entre estancias representadas por puntos a los que se le asigna una tipología y área específicos, y que se encuentran unidos por líneas que representan las conexiones.

Fig 6.8. Esquema descriptivo del proceso.

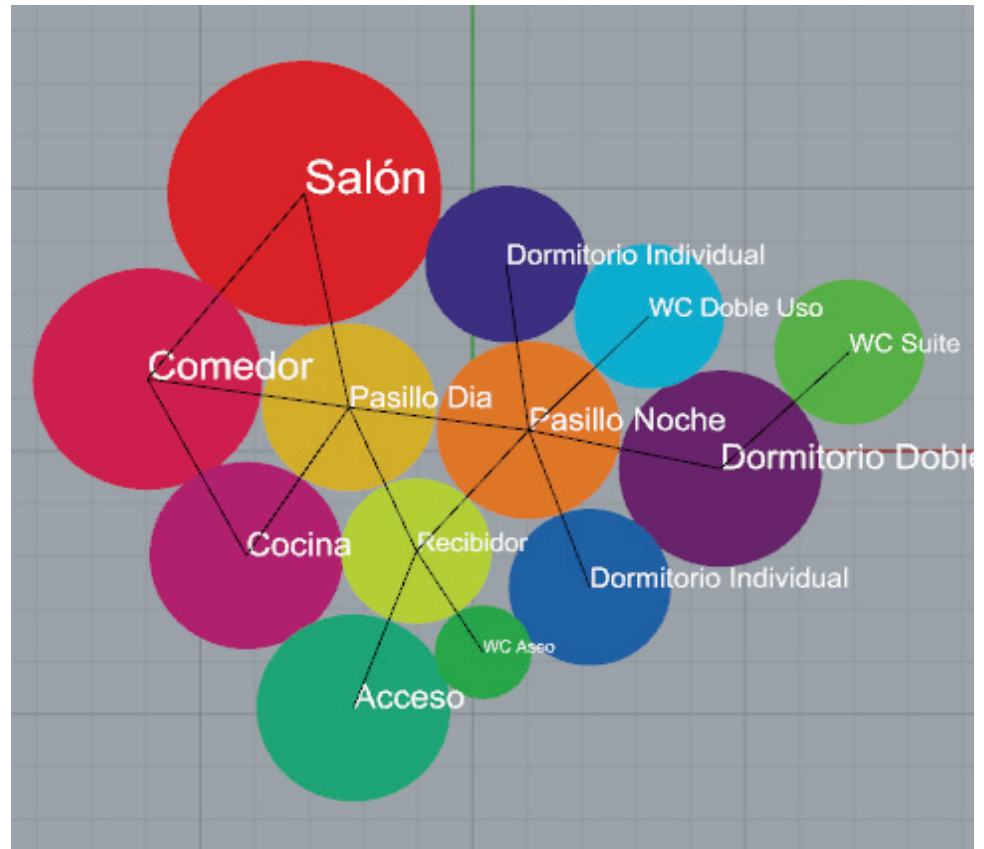


Fig 6.9

Pese a que la forma de las estancias no es circular sino ortogonal, la distribución en círculos proporcionales a sus áreas facilita enormemente el posterior encaje entre piezas. Como resultados de este proceso obtenemos un diagrama representado (para su visualización) y unas coordenadas de los puntos en su posición final, que junto a la información anterior nos llevarán a conseguir un diagrama de planta más concreto en la siguiente fase.

Fig 6.9. Diagrama obtenido con Space Syntax para el ejemplo.

El principal objetivo de esta segunda fase es convertir el diagrama abstracto de coordenadas y relaciones en uno más concreto capaz de ser traducido en estancias para una posterior planta de la vivienda.

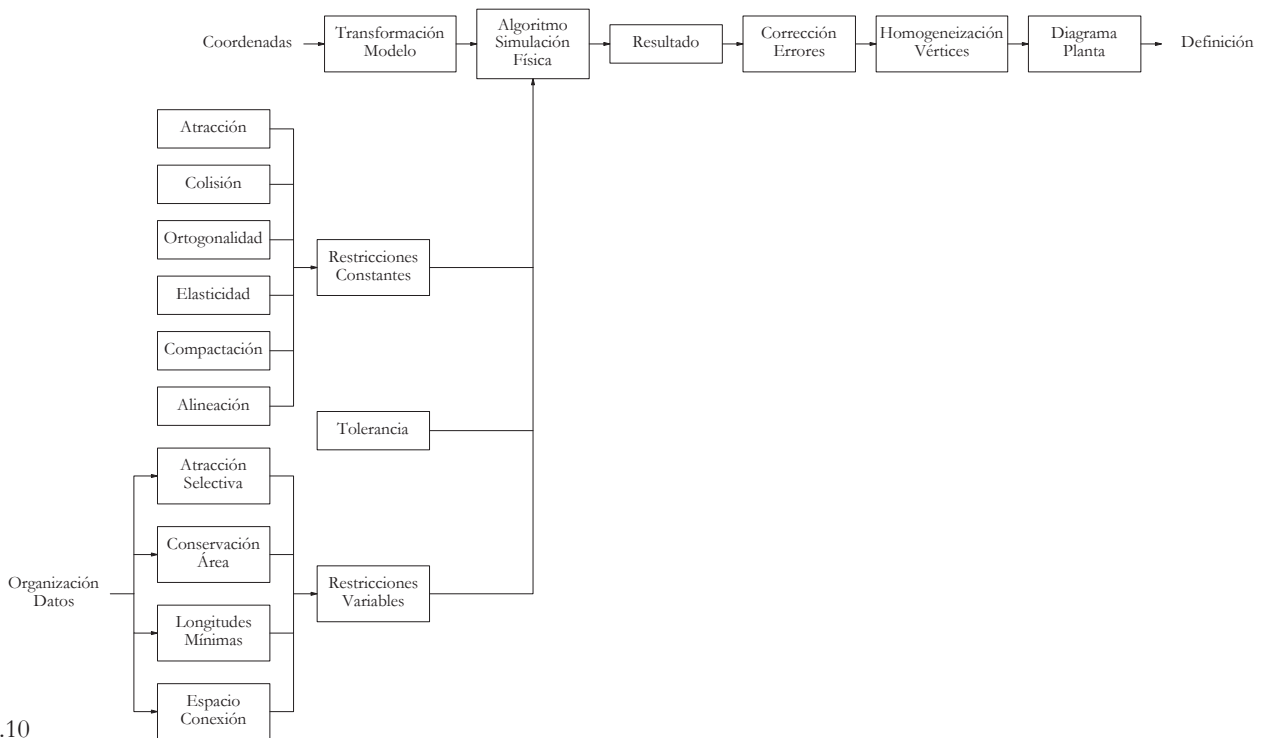


Fig 6.10

Utilizaremos para ello Kangaroo Physics, un motor de física en vivo para la simulación interactiva, la optimización y la form-finding. Este algoritmo permite asignar cualidades físicas a figuras geométricas en forma de restricciones y fuerzas. Todas aquellas restricciones a la deformación que no contemplemos se producirán inevitablemente en busca del equilibrio de fuerzas.

Fig 6.10. Esquema descriptivo del proceso.

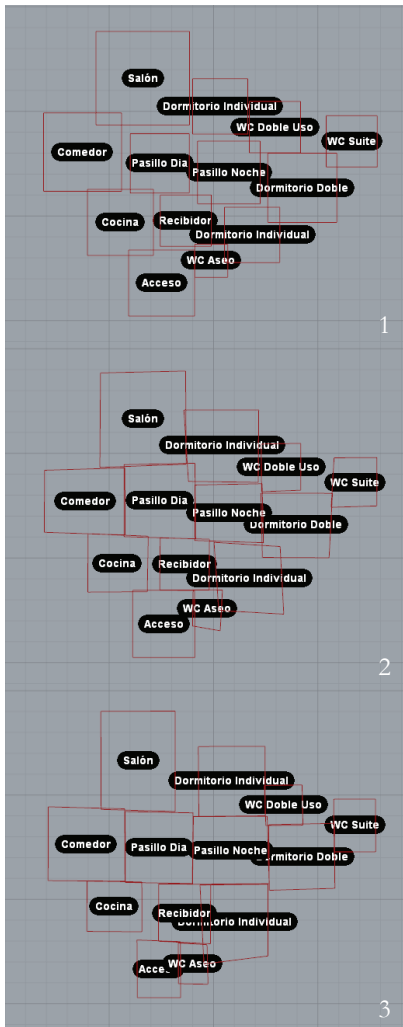


Fig 6.11

Fig 6.11. Fotogramas del proceso iterativo que lleva a cabo Kangaroo Physics, desde el diagrama inicial hasta el resultado final.

La influencia de estas restricciones se fija mediante un valor numérico que establece la proporcionalidad de dicha influencia respecto al conjunto. Por este motivo es imposible alcanzar un resultado en el que todas se apliquen de manera íntegra.

El resultado de la secuencia generada por Kangaroo será un punto de equilibrio en el que todas las restricciones y fuerzas se habrán aplicado de manera proporcional a su influencia. Para este caso hemos utilizado una serie de fuerzas y restricciones que enumeramos a continuación con una breve descripción de sus características:

1. Restricciones constantes. Aquellas que no dependen de los parámetros introducidos en el programa:

- 1.1. Atracción. Una fuerza vectorial que dirige todas las piezas hacia el centro de gravedad de la figura
- 1.2. Colisión. Ninguna pieza se superpone a las otras, son consideradas como sólidos bidimensionales
- 1.3. Ortogonalidad. Se conservan los ángulos iniciales de  $90^\circ$  en los vértices
- 1.4. Elasticidad. No existe resistencia ninguna a las variaciones dimensionales de las líneas que componen las piezas.
- 1.5. Compactación. El conjunto de la figura se intenta acoplar a un área descrita más pequeña que el conjunto.
- 1.6. Alineación. Las piezas se ajustan a unas directrices comunes.

2. Restricciones variables. Están condicionadas por la información importada desde la base de datos, cambian para cada caso:

2.1. Atracción selectiva. Fuerzas de atracción dirigidas a conectar piezas entre las cuales existe conexión espacial de algún tipo.

2.2. Conservación del área. Pese a la flexibilidad en de los lados de las piezas, la relación entre los lados es constante e igual al área deseada para cada estancia.

2.3. Longitudes mínimas. Se restringe la variación dimensional de los lados estableciendo unos valores mínimos, de los que depende la funcionalidad de la estancia.

2.4. Espacio de conexión. Garantiza la existencia de espacio suficiente entre dos piezas conectadas para la ubicación de un hueco que las conecte.

Respecto al valor de la influencia de cada restricción respecto al conjunto, para su obtención se ha debido de calibrar mediante tentativa-error hasta alcanzar el correcto funcionamiento del sistema. Tras dicho calibrado, en orden descendente respecto a su influencia, las restricciones quedarían ordenadas de la siguiente manera: colisión, ortogonalidad, alineación, longitudes mínimas, espacio de conexión, conservación del área, atracción selectiva entre piezas, compactación, atracción y elasticidad.

Tras este proceso obtenemos un diagrama de planta, tal y como el que aparece a continuación (fig 6.13):

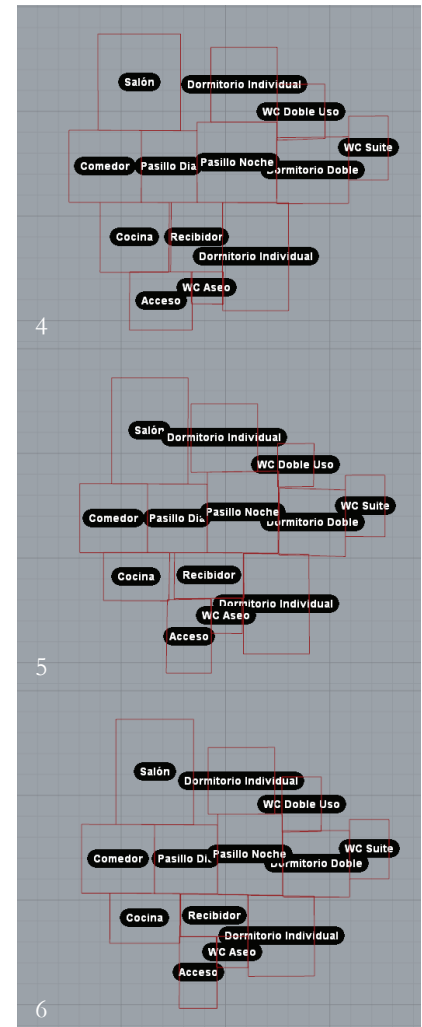


Fig 6.12

Fig 6.12. Fotogramas del proceso iterativo que lleva a cabo Kangaroo Physics, desde el diagrama inicial hasta el resultado final.

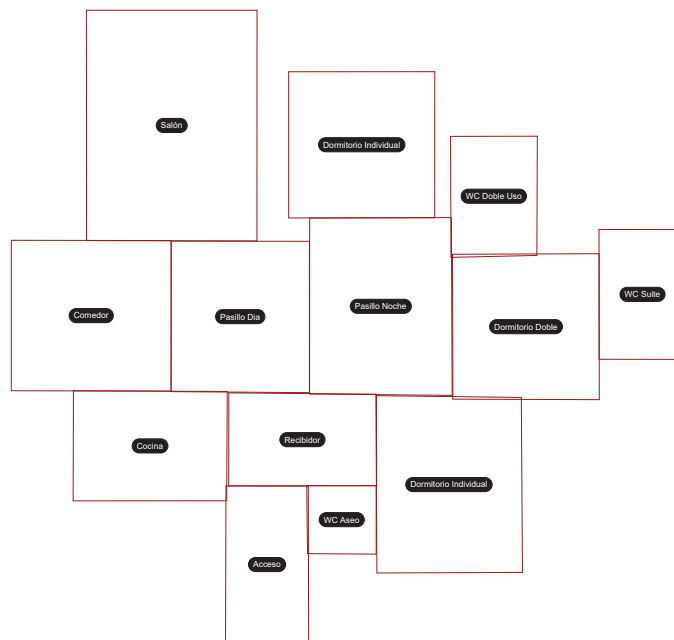


Fig 6.13

Este diagrama presenta varios defectos a la hora de ser traducido a una planta, algunos podrán ser corregidos inmediatamente, sin embargo la corrección de algunas disfuncionalidades exigen un mayor esfuerzo que se pospondrá a siguientes investigaciones.

Existe cierta superposición entre piezas, lo cual generaría duplicidad de tabiques si se tradujese automáticamente a la planta de una vivienda. Para ello será necesario homogeneizar los vértices y eliminar las duplicidades de líneas. Todos los vértices que se encuentren próximos entre ellos (a una distancia menor de 0,2m) se reducen a un único punto promedio de todos los anteriores. Además, se añadirán vértices a algunas piezas para que la macla entre todas

Fig 6.13. Esquema de planta resultado.



las piezas sea completa no solo en aquellos vértices coincidentes. Este es el resultado de este proceso (fig 6.14):

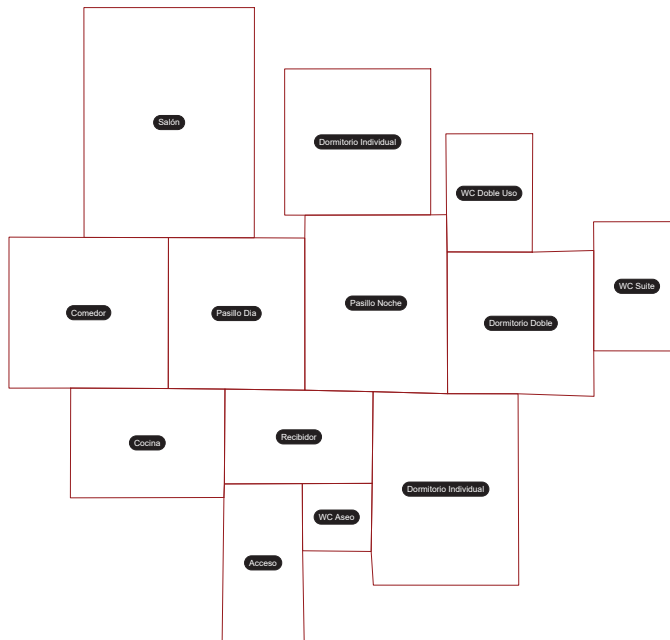


Fig 6.14

Sin querer profundizar demasiado en la corrección de errores de este diagrama, conviene señalar que mejoraría sensiblemente la solución si se evitasen huecos estrechos entre piezas que no permiten el soleamiento interior de ninguna de ellas ( $d < 1,5m$ ). Incluso podría incidirse en la correspondencia entre estancias anexas dependientes, como entre el dormitorio doble y el baño tipo suite.

Con este diagrama se cierra la fase de organización espacial pudiendo avanzar en la definición de la vivienda.

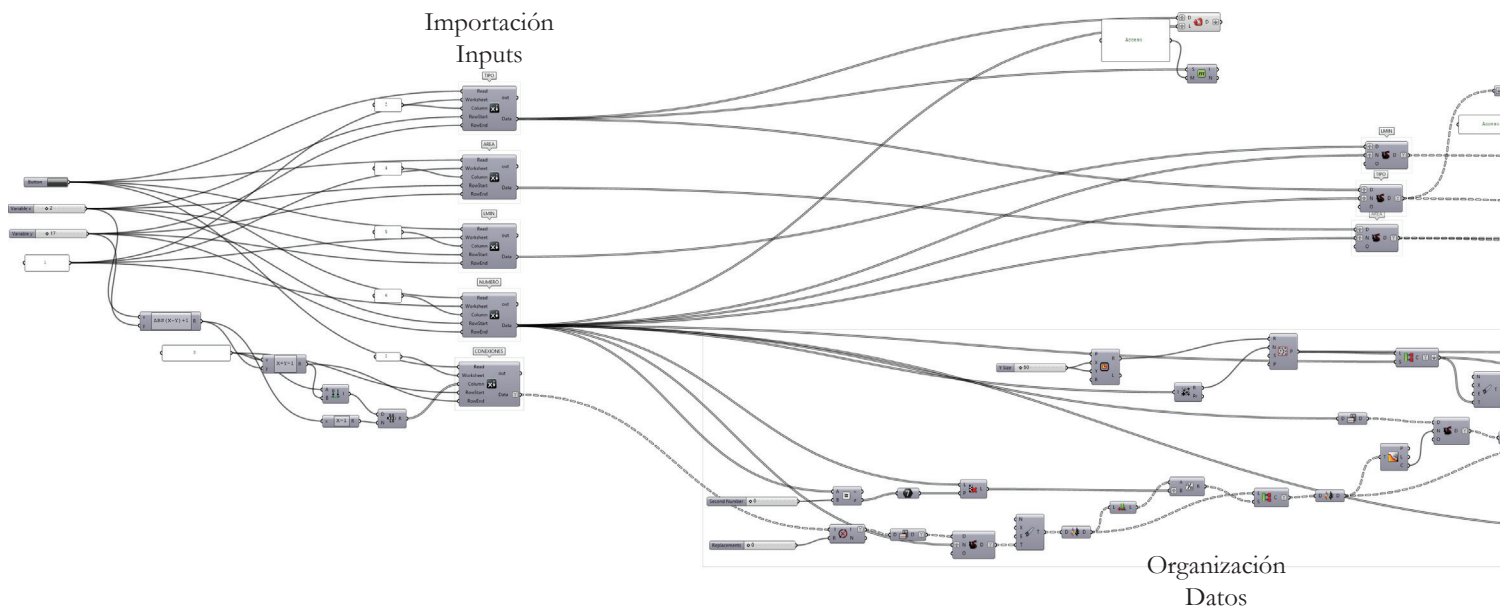
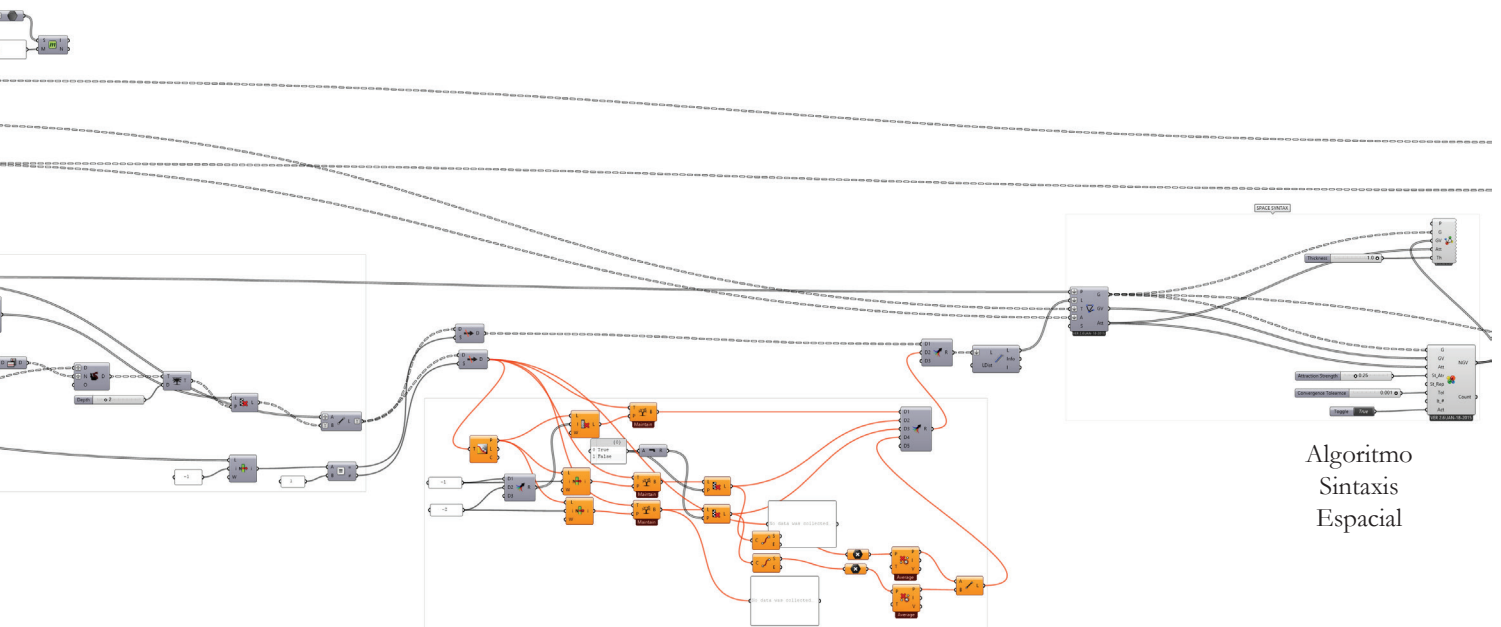


Fig 6.15



Algoritmo  
Sintaxis  
Espacial

Fig 6.15. Definición paramétrica del proceso.

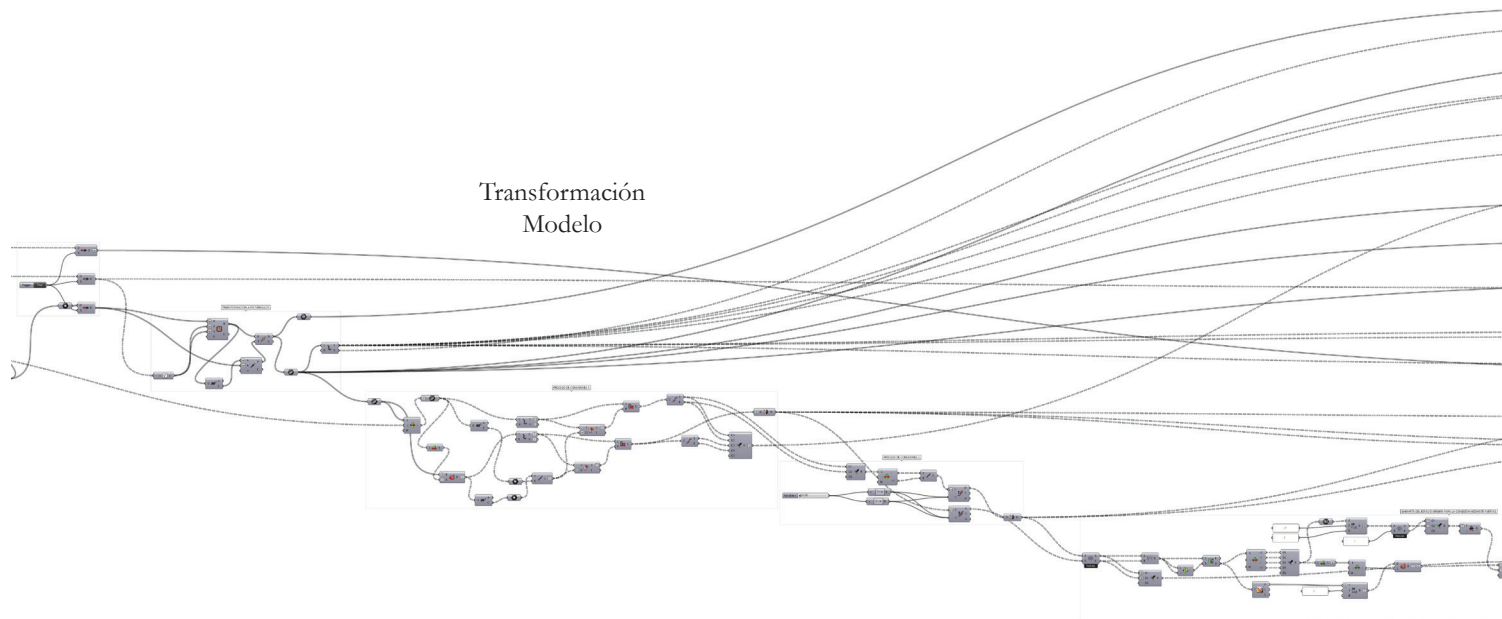


Fig 6.16

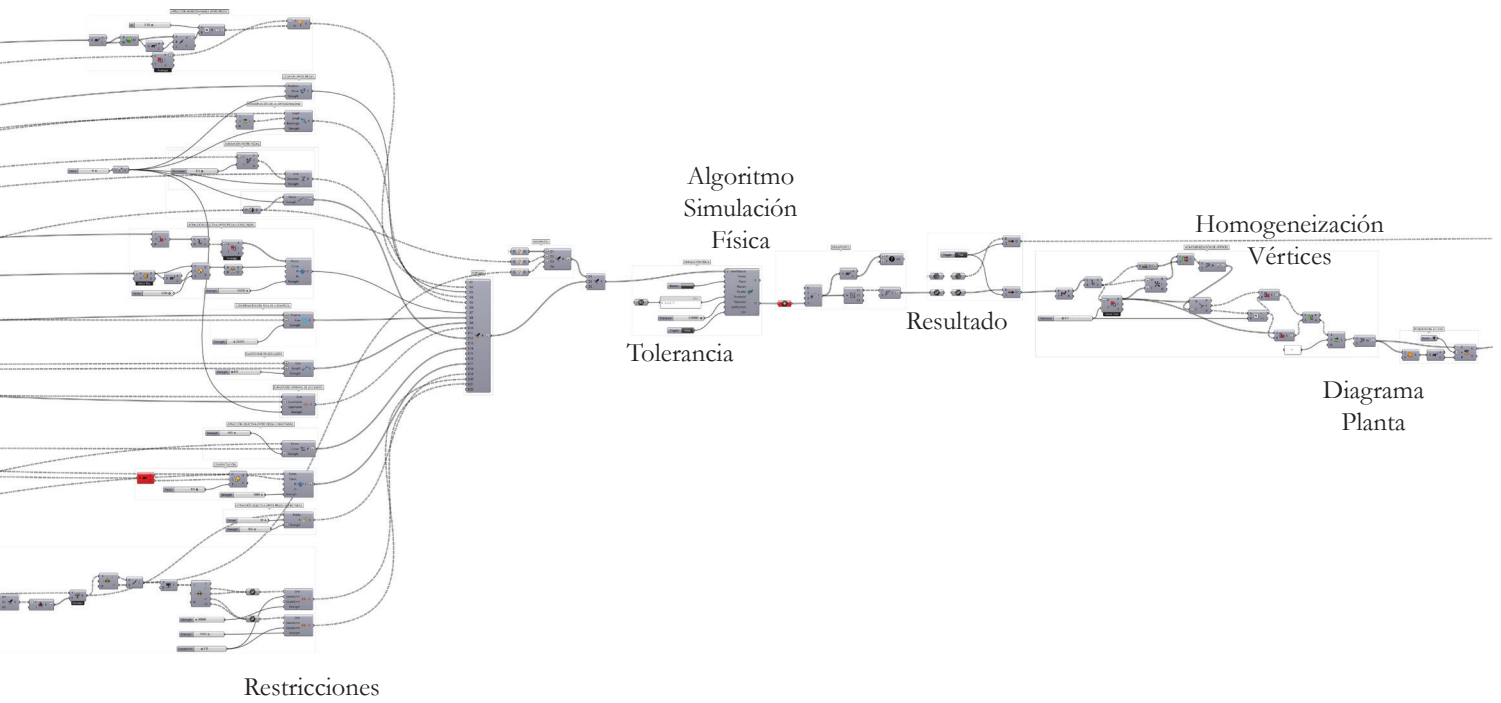


Fig 6.16. Definición paramétrica del proceso.

## **Definición**

La última de las fases del sistema consiste en convertir la información recopilada y generada en un modelo arquitectónico. Si utilizar una herramienta de diseño paramétrico era importante en los apartados anteriores, en este lo es aún más, puesto que en este proceso se despliega el potencial de esta herramienta en cuanto a la automatización de procesos.

Escogemos para esta fase continuar con la misma herramienta con la que veníamos trabajando: Grasshopper 3D ®. Sin embargo, el sistema desarrollado está abierto a la utilización mixta de este programa y de algún programa tipo BIM, como Revit Architecture ® o ArchiCAD ® ya que existen multitud de plug-ins que facilitan el flujo de información entre softwares. El potencial de esta utilización mixta vendría del máximo aprovechamiento de ambos sistemas: grasshopper para la automatización del proceso, y un sistema BIM para la definición y cuantificación de los elementos.

Como objetivo en esta fase fijamos conseguir un modelo en planta sencillo y un modelo 3D con un nivel mayor de definición. Deberemos definir para ello los siguientes elementos: muros, forjados, cubierta, huecos, estructura y elementos de protección solar. Para ello nos valdremos tanto del diagrama en planta obtenido como en los datos procesados con anterioridad

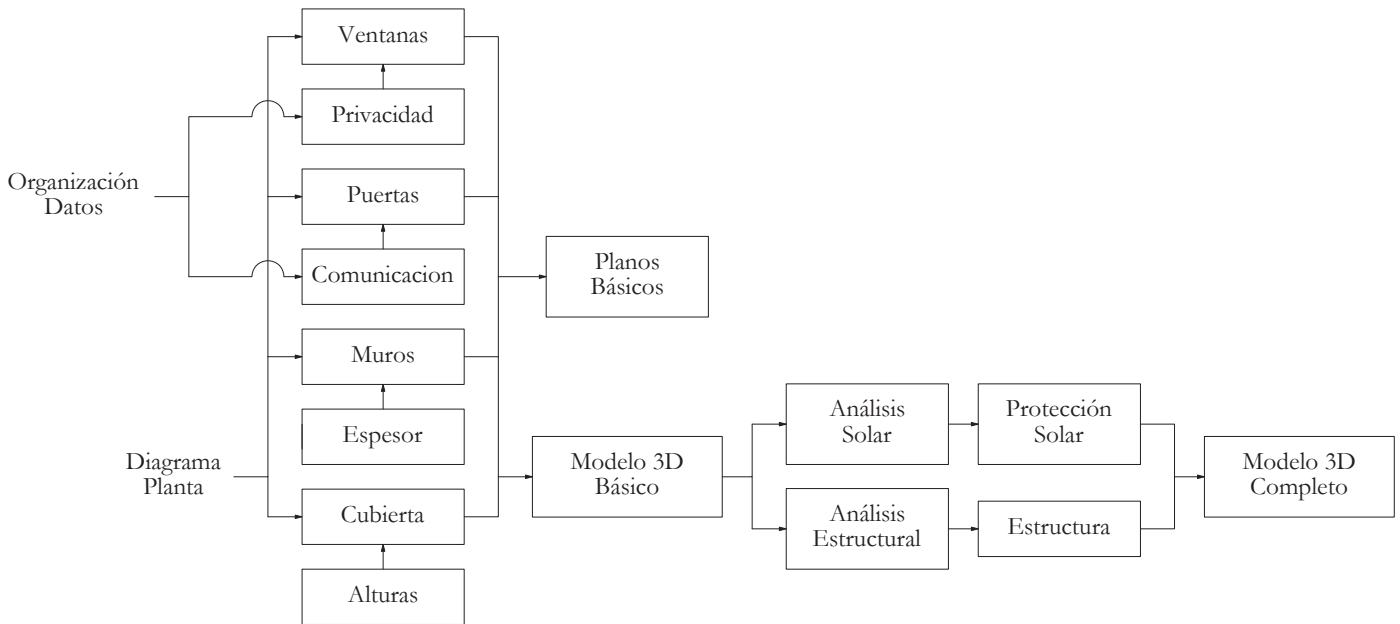


Fig 6.17

En primer lugar, desarrollaremos tanto en 3D como en planta, las particiones interiores y cerramientos, para lo cual nos valdremos del diagrama de planta y de unas alturas de cornisa que fijaremos proporcionales al área de la estancia.

A continuación, a partir de la misma información utilizada para el paso anterior definiremos la cubierta. La definimos como una cubierta plana sencilla, para facilitar la posterior idealización de la estructura. La principal dificultad que plantea este proceso es la de modelizar los antepechos en correspondencia con las particiones interiores. Entre ellos se producen desfases que son difíciles de racionalizar. En este trabajo hemos fijado 5 alturas diferentes de cornisa que van de 2,7 a 3,9m en intervalos de 0,3m. No comportaría ninguna dificultad

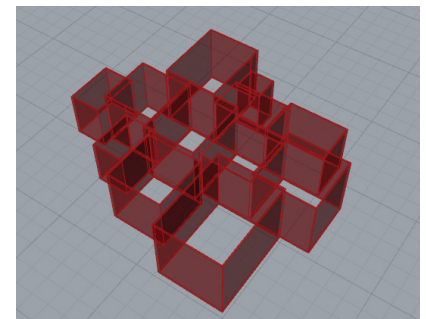


Fig 6.18

Fig 6.17. Esquema descriptivo del proceso.

Fig 6.18. Modelo 3D de los muros.

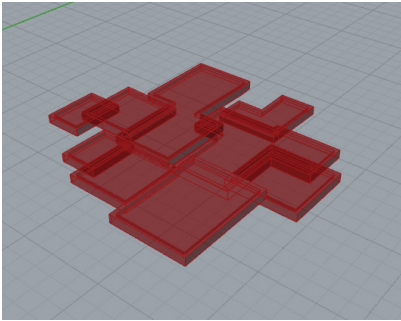


Fig 6.19

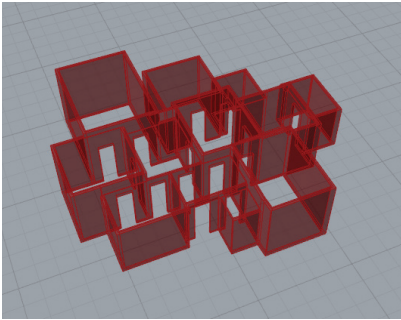


Fig 6.20

aumentar o reducir el número de variables o incluso realizar una cubierta completamente plana. El sistema se ha diseñado en base a esta posibilidad.

Por lo que se refiere a los huecos, es necesario diferenciar entre puertas y ventanas ya que para su ubicación se seguirán lógicas distintas.

La disposición de las puertas viene definida por la conexión entre estancias determinada en el diagrama de conexiones. Para su definición aislaremos los tabiques que comparten las estancias a conectar y ubicaremos en ellos el hueco de la puerta. Por defecto se ha determinado el punto central de este tabique, es conveniente si en un futuro se desarrolla la distribución automática del mobiliario para este sistema que esta posición pueda variar. Tanto en 3D como en 2D empleamos sustracción booleana para la definición del hueco. En planta se ha parametrizado el sentido de apertura de la puerta.

Para la definición de las ventanas, diferenciamos dos tipos de estancias conforme a su nivel de privacidad: aquellas con un nivel menor de privacidad requerirán una mayor conexión con el exterior por lo que dispondremos en ella un ventanal, mientras que las que demandan una mayor intimidad se conectarán al exterior mediante un hueco más reducido. Tal y como ocurría con los huecos de las puertas, emplearemos sustracción booleana para la materialización de los huecos.

Fig 6.19. Modelo 3D de la cubierta.

Fig 6.20. Definición en 3D de las puertas.

Postergamos la definición de elementos de protección solar a una fase posterior en la que podamos realizar un correcto análisis solar del volumen de la vivienda. De esta manera podremos condicionar su geometría a la incidencia



solar sobre cada paño.

Llegados a este punto ya podremos extraer del programa un modelo 3D básico y una distribución básica en planta que mostramos a seguir (fig 6.22):

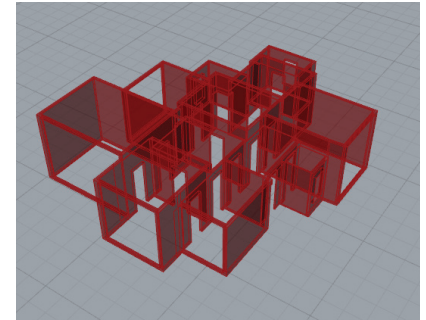


Fig 6.21

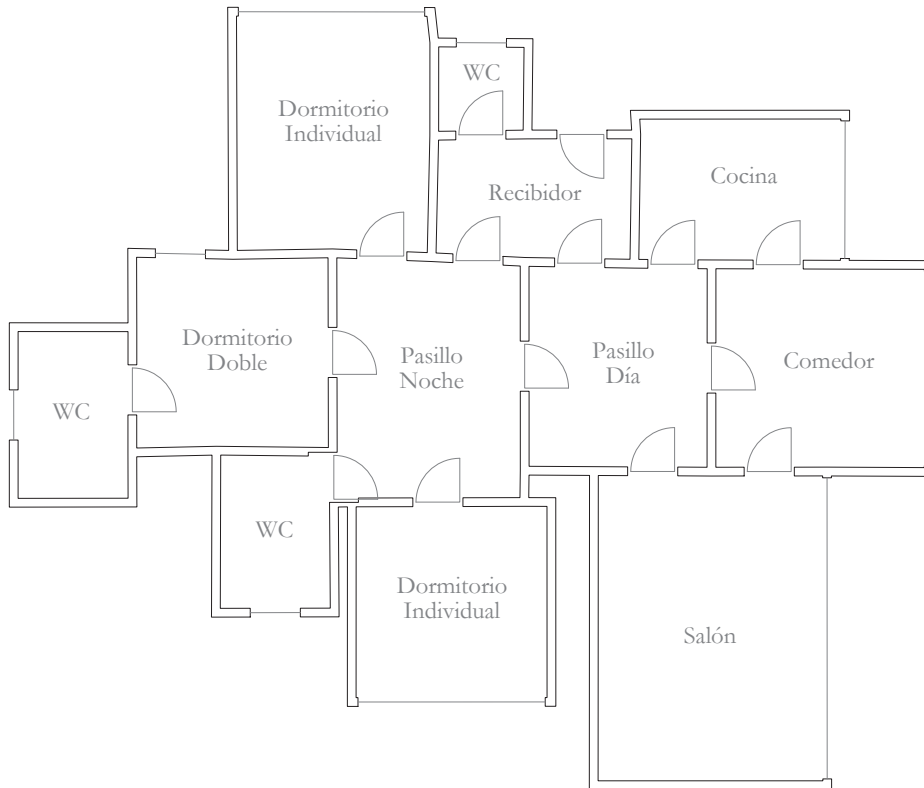


Fig 6.22

Éste será el nivel máximo de definición en 2D de la vivienda al que llegaremos en este trabajo. Este nivel es suficiente para evaluar la adecuación de los resultados conforme al objetivo inicial del trabajo. Por otro lado a partir del modelo básico en 3D podremos profundizar en la cuestión estructural y en los

Fig 6.21. Definición en 3D de las ventanas.

Fig 6.22. Planta básica de la vivienda.

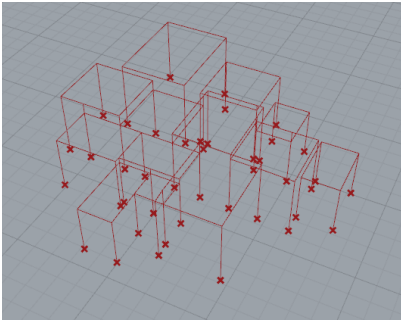


Fig 6.23

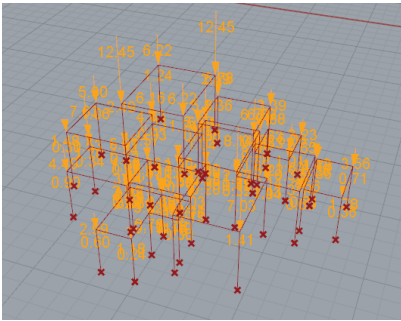


Fig 6.24

Fig 6.23. Idealización en 3D diferenciando apoyos, soportes y vigas.

Fig 6.24. Aplicación de las cargas sobre el modelo idealizado de la estructura.

sistemas de protección solar.

Para la estructura, en primer lugar deberemos idealizar el modelo mediante líneas y puntos que representen pilares, vigas y apoyos. Este proceso de idealización debe ser preciso y exige una gestión compleja de la información, especialmente en lo que se refiere a los encuentros.

Con el modelo idealizado podremos valernos de un componente de análisis estructural para Grasshopper 3D ® llamado Karamba 3D®. Karamba es una herramienta paramétrica de ingeniería estructural que proporciona un análisis preciso de entramados y mallas espaciales. Karamba está plenamente integrada en el entorno de diseño paramétrico de grasshopper, un plug-in para la herramienta de modelado 3D Rhinoceros. Esto facilita la combinación de modelos geométricos parametrizados, con cálculos de elementos finitos y algoritmos de optimización como Galápagos.

Como solución constructiva escogeremos la estructura metálica principalmente por tratarse de un sistema industrializado al que se le pueden trasladar fácilmente las medidas de las piezas obtenidas paramétricamente para su posterior ejecución. En cuanto a las cargas, nos remitimos al documento CT DB SE-AE del Código Técnico de la Edificación.

Como resultado del dimensionamiento en base a la flecha activa y a las tensiones normales obtenemos perfiles normalizados con secciones relativamente reducidas (IPE 80 y HEB 100). Finalmente este algoritmo nos permite extraer gráficamente la distribución de tensiones y deformaciones mediante cálculo de elementos finitos.

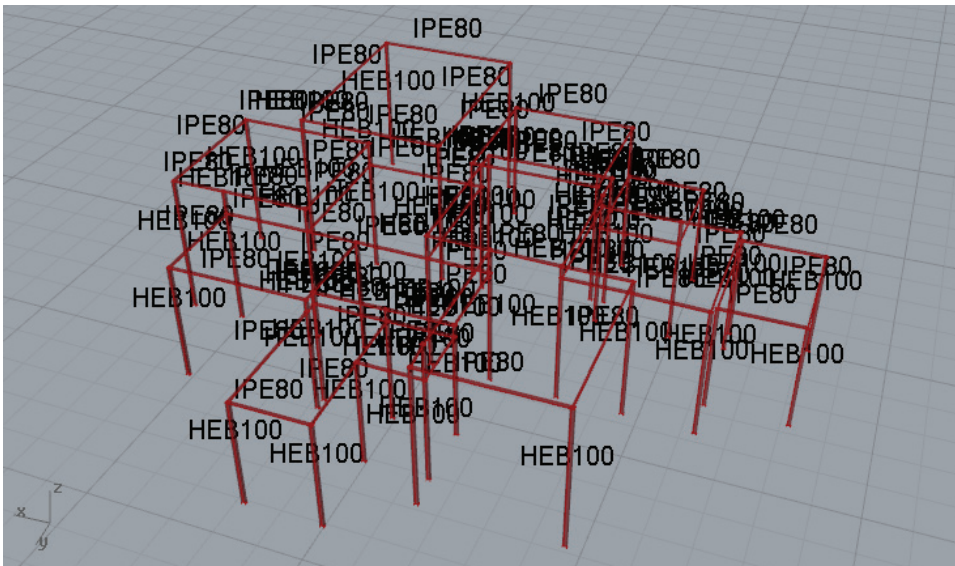


Fig 6.25

Por último, mediante análisis solar podremos definir elementos de protección solar ajustados a los resultados obtenidos. Para el análisis solar emplearemos tanto un plug-in de Grasshopper 3D® como un programa externo: Geco® y Autodesk Ecotect®.

Ecotect es un software visual de simulación medioambiental específicamente diseñado para las primeras etapas de diseño conceptual, permitiendo la interacción modelo-resultado para entender los factores ambientales y su repercusión sobre el rendimiento climático de la vivienda.

Geco® es un plug-in que ofrece un enlace directo entre modelos tridimensionales de Rhino® / Grasshopper® y Autodesk Ecotect®.

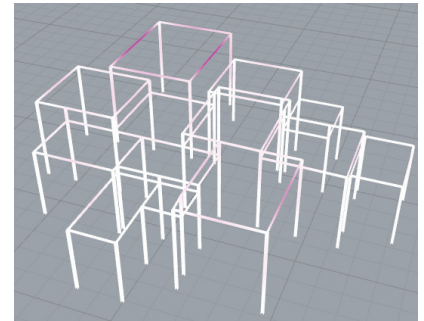


Fig 6.26

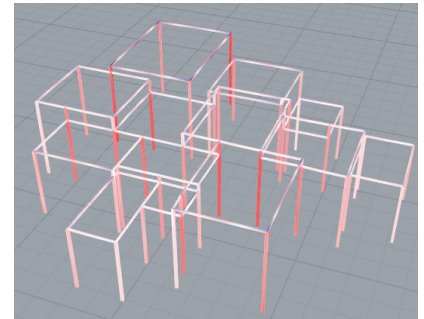


Fig 6.27

Fig 6.25. Perfiles obtenidos tras el dimensionamiento de la estructura

Fig 6.26. Distribución de deformaciones en la estructura.

Fig 6.27. Distribución de tensiones normales en la estructura.

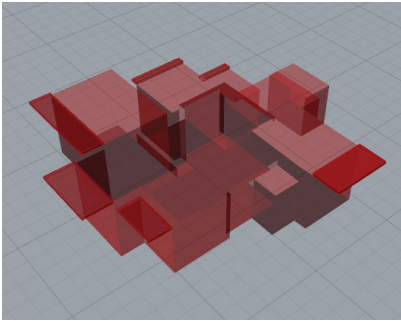


Fig 6.28

Para la obtención de los valores de la radiación solar diaria que incide sobre el edificio, deberemos transformar el sólido del edificio en una malla tridimensional y fijar tanto la fecha para la que se quiere simular la radiación como el emplazamiento de la edificación. Escogeremos pues como fecha el 21 de junio (solsticio de verano) y como emplazamiento la ciudad de Valencia.

Tras exportar el modelo y los condicionantes, Ecotect realiza un análisis de radiación solar, aportándonos los valores de radiación que incide sobre cada cara de la malla y un modelo visual que permite comprender fácilmente estos valores.

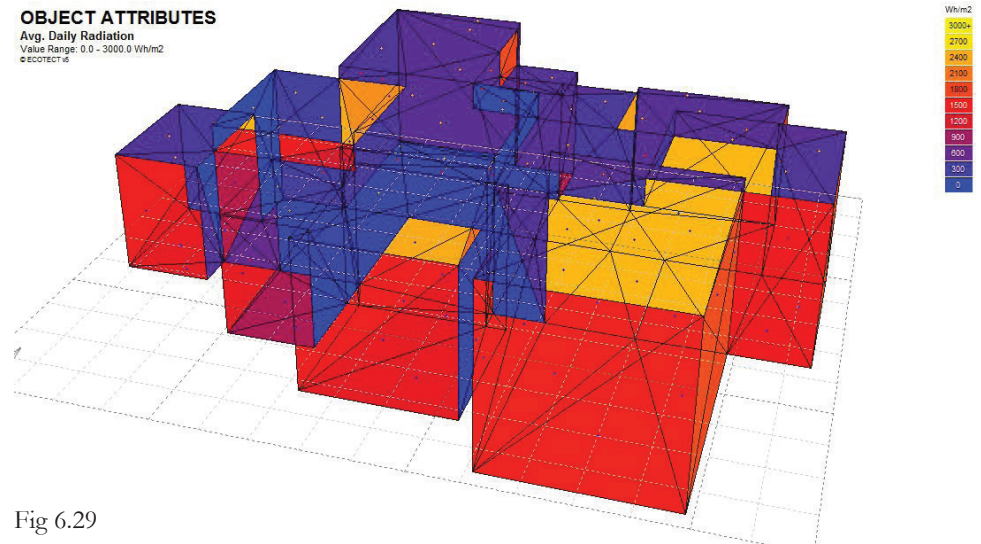


Fig 6.29

Fig 6.28. Definición en 3D de los voladizos.

Fig 6.29. Radiación solar media incidente sobre cada una de las fachadas y caras de la cubierta obtenida con Ecotect.

Con estos valores, definiremos el vuelo de los voladizos sobre las ventanas que evitarán la entrada de luz solar directa en la vivienda en los momentos de mayor intensidad solar. La dimensión de los voladizos oscila

entre 0 y 2 metros, para la traducción de los valores de radiación solar, extrapolaremos los datos numéricos obtenidos comprendidos entre 0 y 2000Wh/m<sup>2</sup> a este nuevo intervalo. Para racionalizar el proceso constructivo, tal y como haríamos con la cubierta, redondeamos por proximidad los valores alcanzados pudiendo obtener vuelos 0'0, 0'4, 0'8, 1'2, 1,6 o 2'0m.

Habiendo definido muros, cubierta, puertas, ventanas, estructura y voladizos, disponemos ya del modelo 3D definitivo mostrado a continuación:

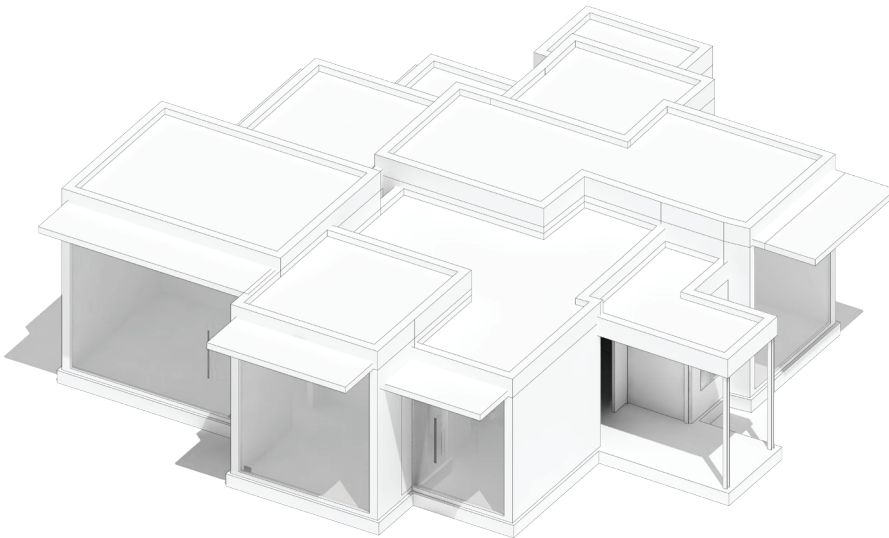


Fig 6.30

Fig 6.30. Modelo 3D completo de la vivienda.

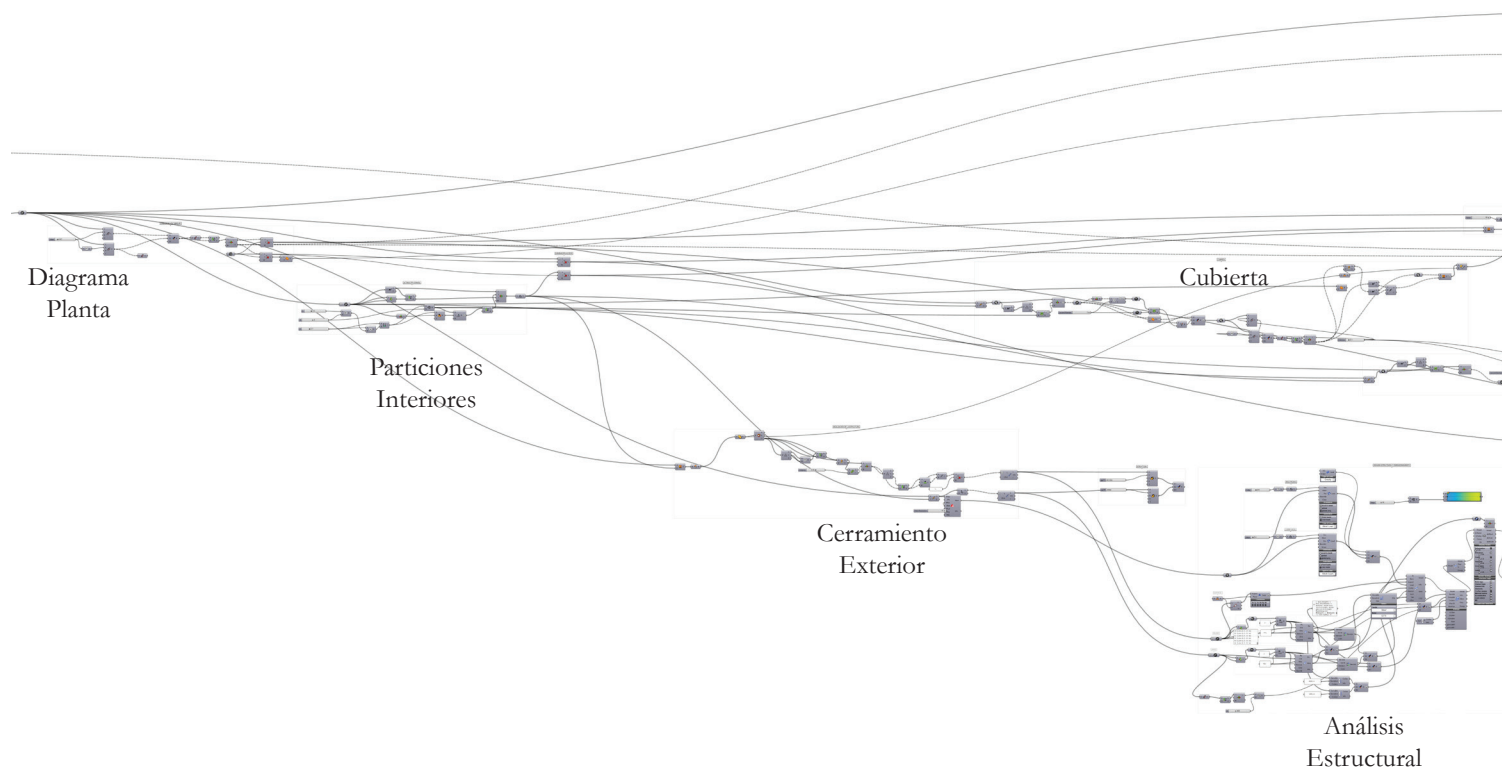


Fig 6.31

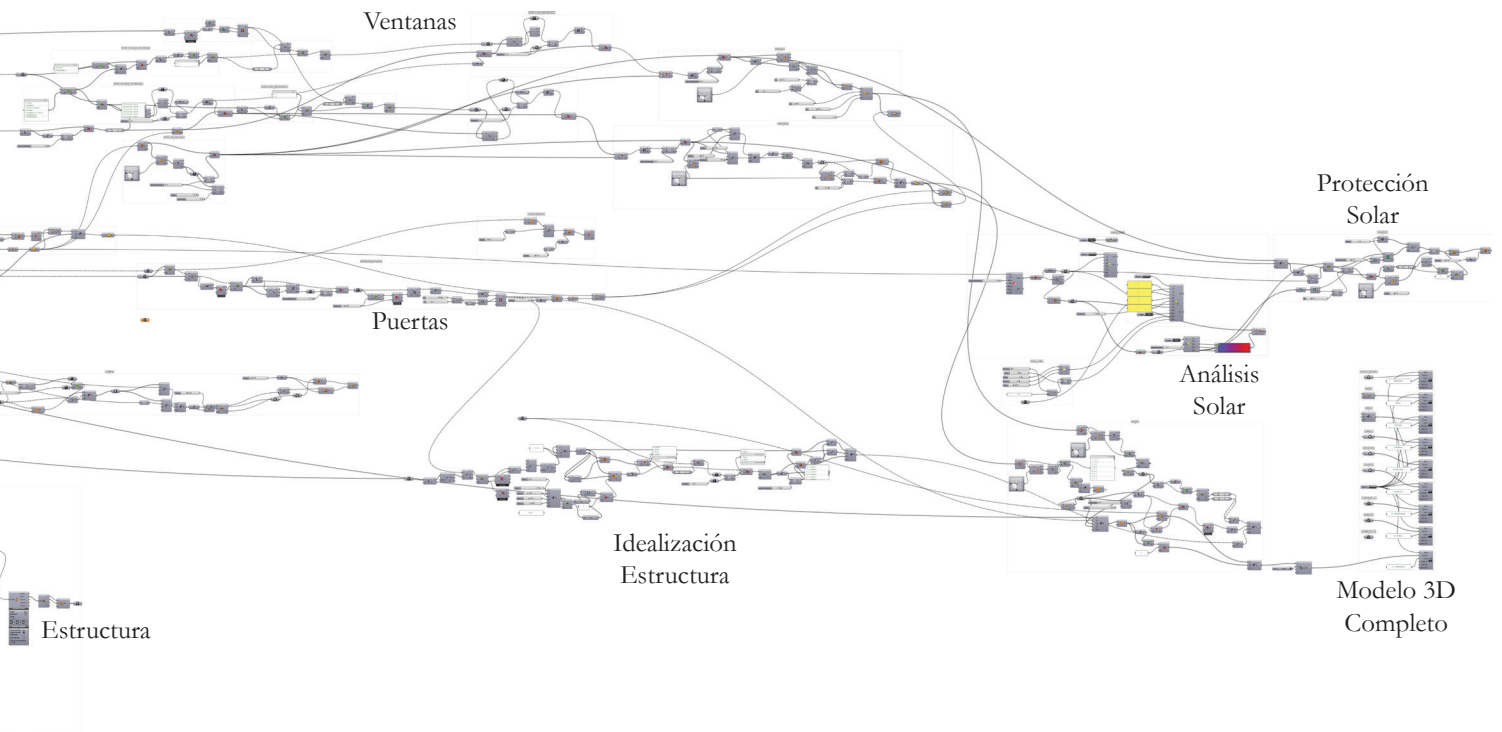


Fig 6.31. Definición paramétrica del proceso.

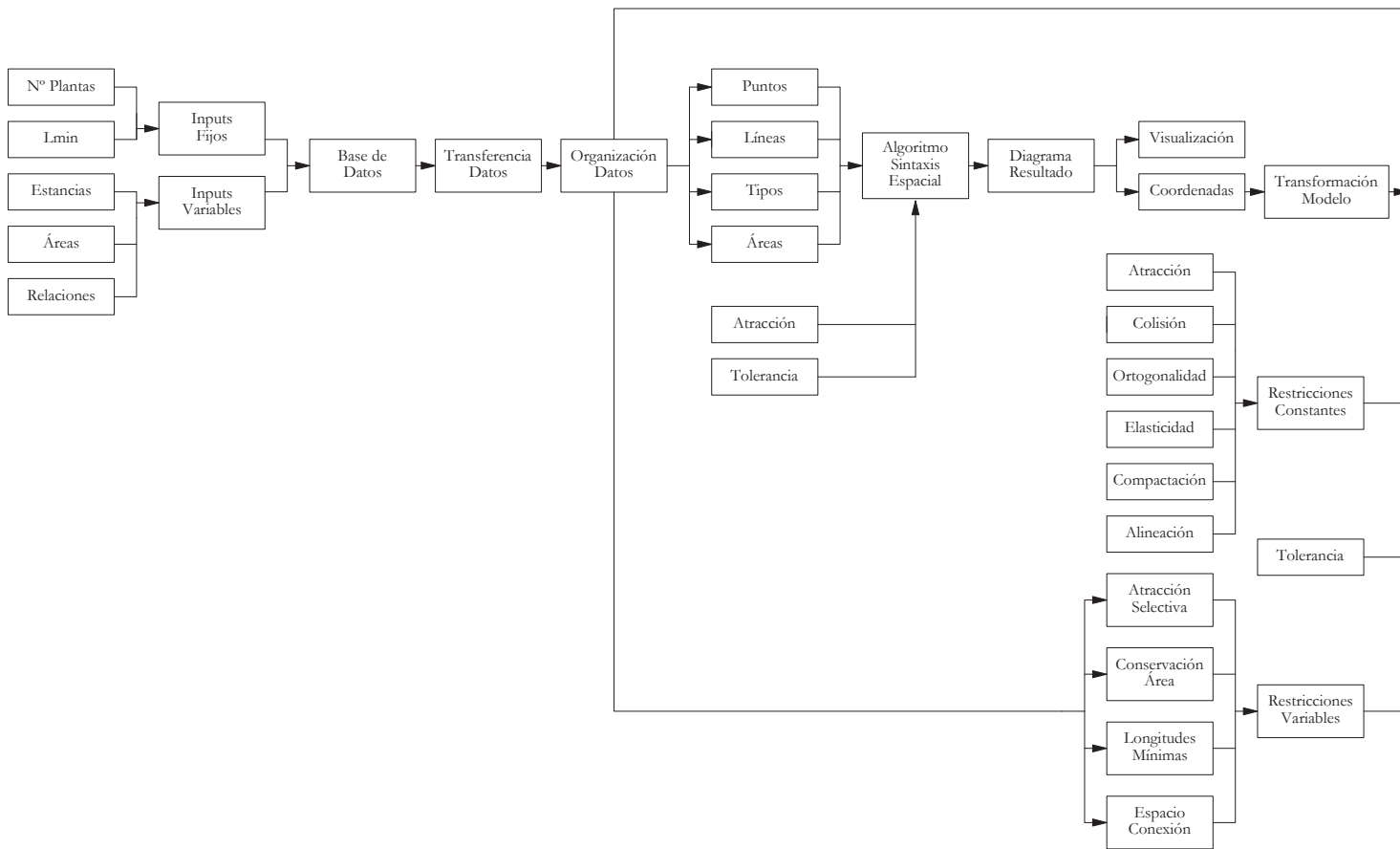


Fig 6.32



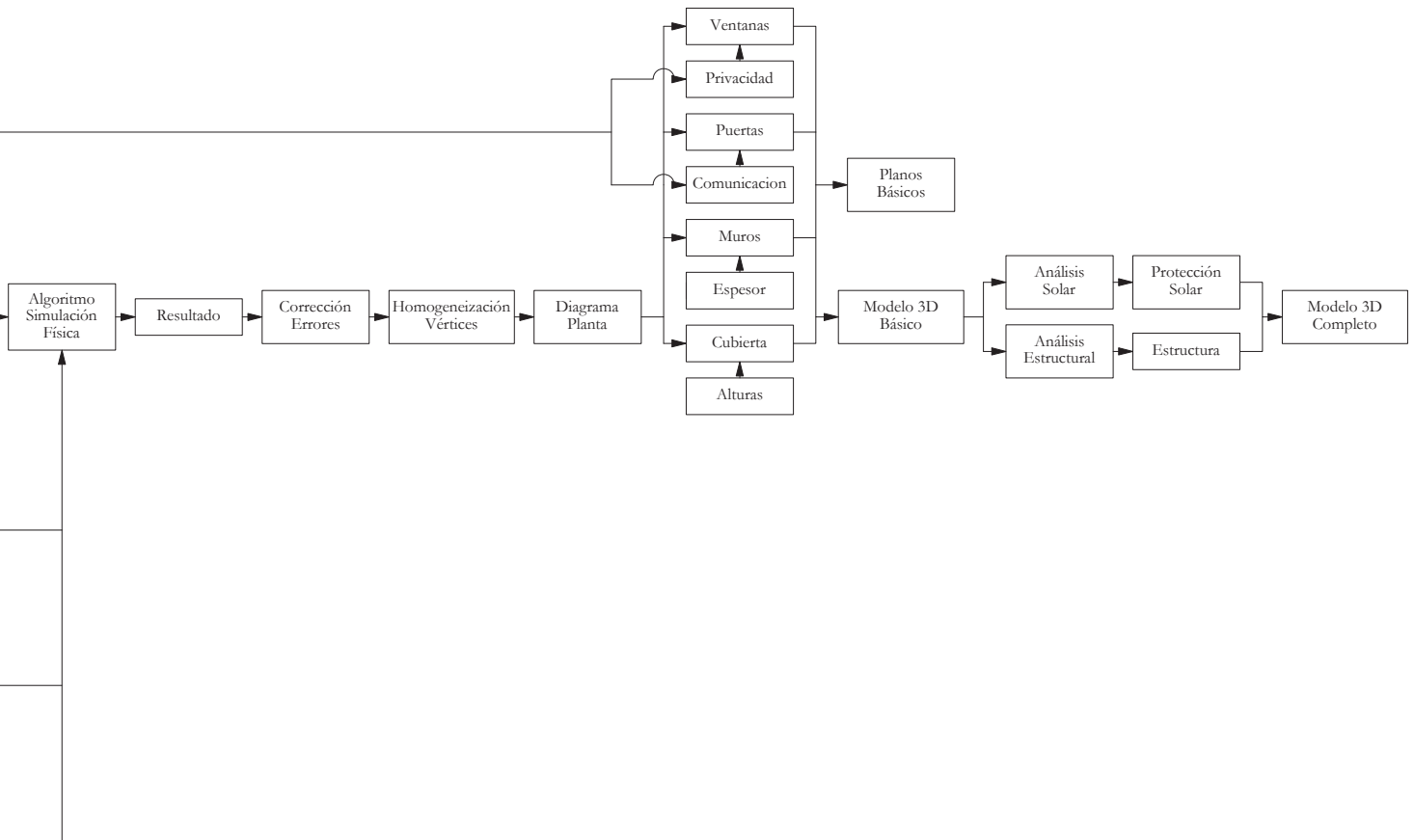


Fig 6.32. Diagrama metodológico general.

## **7. RESULTADOS**

## Evaluación del sistema

Para evaluar los resultados obtenidos trataremos de analizar objetivamente errores, desviaciones, y eficiencia del sistema.

Definiremos como bug o error, aquellos fallos que, ocasionados por la configuración del sistema, imposibilitan llegar a resultado alguno. Para testar este fenómeno, estableceremos 12 tipologías diferentes, las cuales aplicaremos y comprobaremos los resultados obtenidos.

Combinaciones	Salón amplio	Salón reducido	Comedor amplio	Comedor reducido	Salón-Comedor	Cocina doble	Cocina compacta	Dormitorio doble	Dormitorio individual	WC completo	Aseo de cortesía	WC tipo suite	Recibidor	Pasillo de día	Pasillo de noche	Numero de Estancias	Resultado
1					1		1	1		1			1	1	1	7	Favorable
2					1		1	1		1	1		1	1	1	8	Favorable
3					1		1	1	1	1			1	1	1	8	Favorable
4					1		1	1	1	1	1		1	1	1	9	Favorable
5		1		1			1	1	1	1			1	1	1	9	Favorable
6		1		1			1	1	1	1	1		1	1	1	10	Favorable
7	1		1			1		1	1	1			1	1	1	9	Favorable
8		1		1			1	1	1	1	1		1	1	1	10	Favorable
9	1		1			1		1	1	1	1		1	1	1	10	Favorable
10	1		1			1		1	1	1	1	1	1	1	1	11	Favorable
11	1		1			1		1	2	1	1	1	1	1	1	12	Favorable
12	1		1			1		1	3	1	1	1	1	1	1	13	Desfavorable

Fig 7.1. Tabla para la evaluación de errores o bugs en el sistema.

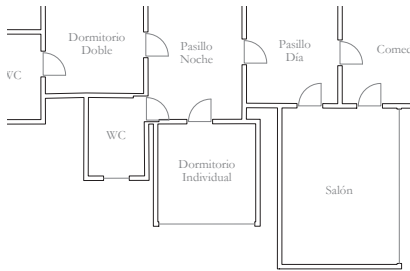


Fig 7.2

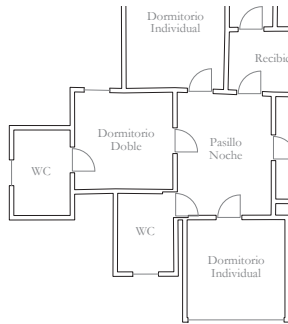


Fig 7.3

Fig 7.2. Huecos estrechos entre estancias.

Fig 7.3. Falta de correspondencia entre estancias interdependientes.

Podemos comprobar que existe una prueba entre doce en la que ha aparecido un error que no ha permitido desarrollar el sistema. Esto representa un 8,3% de las pruebas, coincidente con el caso de mayor complejidad. El error del sistema se ubica en la distribución espacial, el apartado de sintaxis espacial es incapaz de generar un diagrama válido para esta tipología. Prácticamente en la totalidad de los casos se puede llegar a un resultado favorable con una leve modificación en la métrica de alguna estancia.

A continuación evaluaremos las desviaciones del sistema respecto a las expectativas iniciales. Las más evidentes son las señaladas en el segundo apartado del capítulo 6 y afectan a la organización espacial. Aparecen huecos estrechos entre piezas que no permiten el soleamiento interior de ninguna de ellas, además localizamos ciertos errores en la correspondencia entre estancias anexas dependientes, como entre el dormitorio doble y el baño tipo suite, además, la pérdida de ortogonalidad de las piezas evidencia falta de precisión en el proceso de diseño.

En tercer y último lugar evaluaremos la eficiencia del sistema, para ello testaremos el tiempo que emplea el programa una vez introducidos los parámetros que definen la vivienda. El resultado obtenido en la vivienda del ejemplo es de 19'157 segundos para la fase de organización espacial y 33'536 segundos para la fase de definición, un total de 52'693 segundos. Si se compara este tiempo con el normal de elaboración de proyecto podemos afirmar que el programa supera las expectativas iniciales en cuanto a eficiencia.

En términos generales, estos resultados demuestran que se puede plantear esta

estrategia como base para una investigación más extensa. Podemos considerar los resultados generales como satisfactorios, pero parece conveniente plantear una serie de mejoras que hagan funcionar el sistema de manera más precisa, logrando resultados más afines a proyectos de la misma naturaleza realizados de manera analógica.

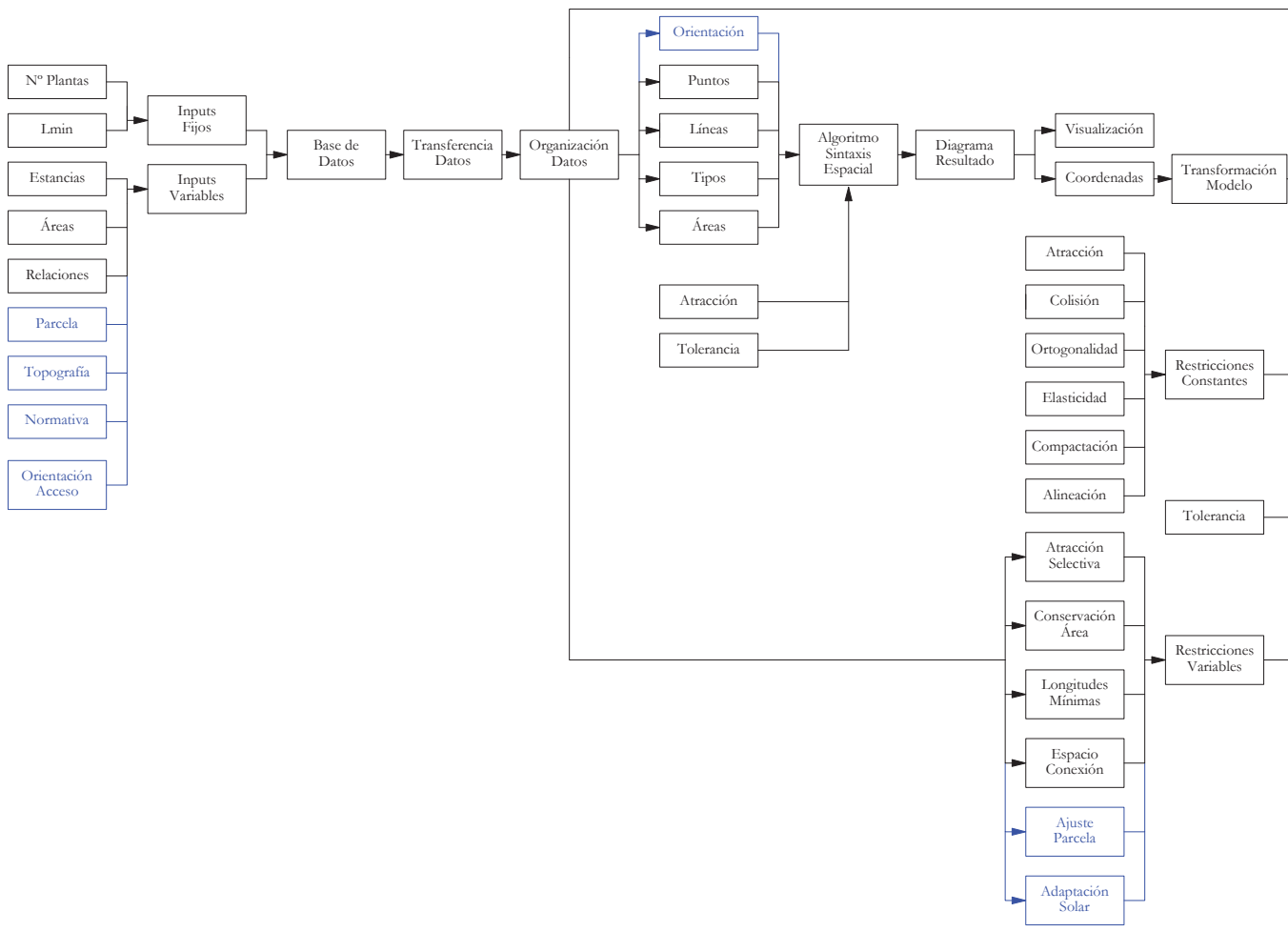
## **8. CONCLUSIONES**

## **Limitaciones y posibles mejoras del sistema**

El objetivo inicial de este trabajo es la elaboración un programa que de manera automática en unos minutos realice la labor que a un arquitecto puede llevarle varias semanas. A diferencia de este programa, los proyectos elaborados convencionalmente siguen un proceso iterativo de mejora continua, en consecuencia, cualquier desviación respecto al objetivo será fácilmente perceptible, especialmente a ojos de cualquier arquitecto.

Automatizar el proceso de diseño, de base exige una simplificación enorme del problema arquitectónico. Se pierden en este proceso multitud de parámetros a tener en cuenta y otras tantas singularidades que hacen que cualquier proyecto sea específico para el contexto espacio-temporal en el que se inserta. Sin embargo, comparando este sistema con los mencionados en el apartado de referentes teóricos, existe una mejora sustancial en cuanto a la capacidad que este sistema tiene para adaptarse a las necesidades del cliente.

Planteando este trabajo como el primer eslabón de una larga cadena, cabe esperar que invirtiendo algo más de esfuerzo y dedicación podrá lograrse incluir cualquier parámetro que sea cuantificable. A corto plazo planteamos una serie de mejoras sobre este mismo sistema que mejorarían su desempeño y por lo tanto, generaría mejores resultados y una mayor cantidad de información.





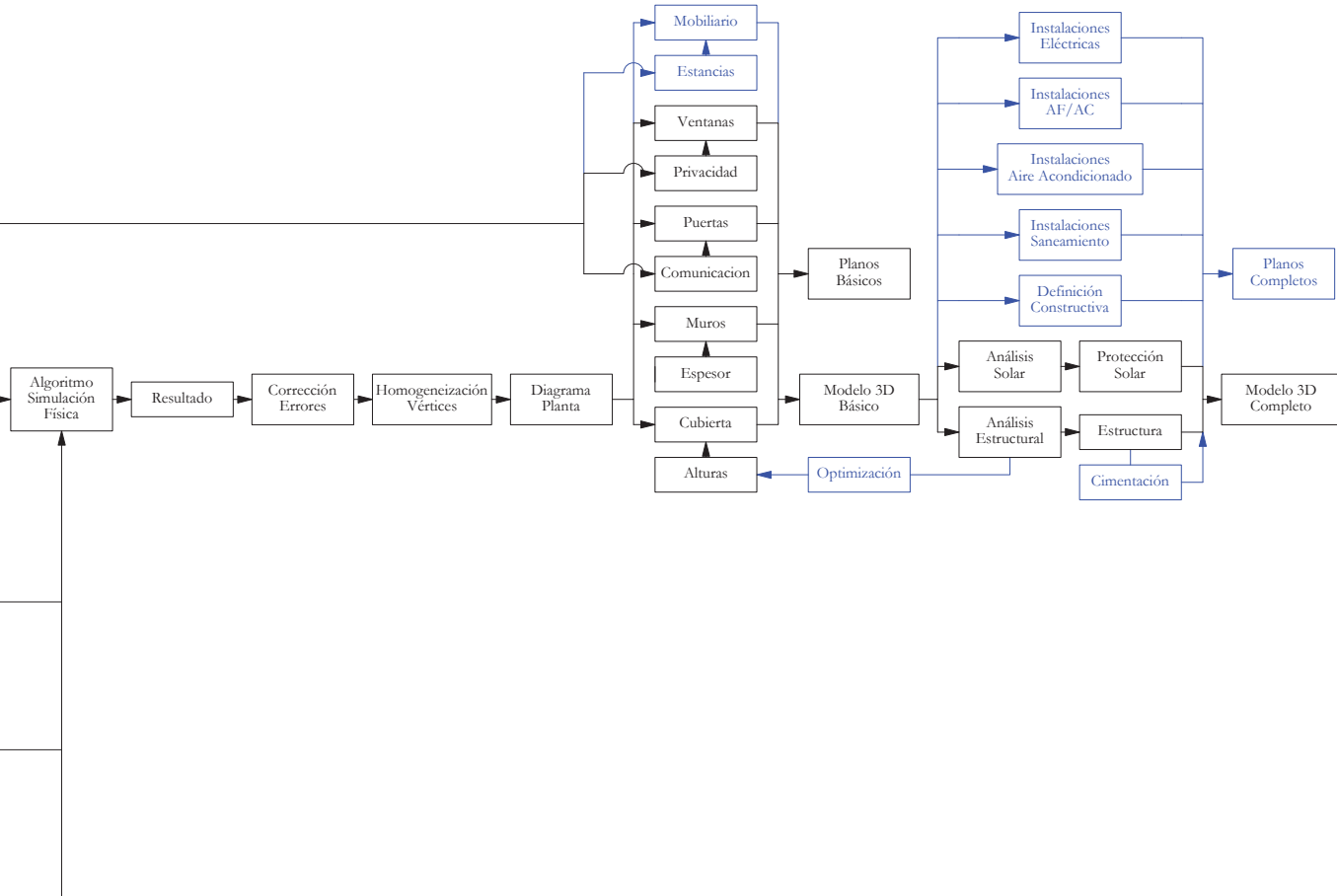


Fig 8.1. Diagrama metodológico general con algunas mejoras posibles a corto plazo (azul).

Como inputs, sería deseable la introducción de cuatro parámetros más: geometría de la parcela, topografía, orientación en el acceso y normativa en materia de edificabilidad y limitaciones volumétricas. Factores que sería deseable tener en cuenta en la fase de organización espacial.

En cuanto a la definición, debería completarse el sistema con más información. Debería, en primer lugar, ser capaz de generar una distribución en planta del mobiliario, siendo capaz en este proceso de alterar en cierta medida la distribución general de la vivienda. Por otro lado, sería deseable automatizar la distribución, cálculo y dimensionamiento de las instalaciones (eléctricas, AF/AC, aire acondicionado, saneamiento), al mismo tiempo que adaptar ciertas soluciones constructivas tipo a las dimensiones concretas de la vivienda obtenida por el sistema. De esta manera lograríamos llegar a automatizar todo el diseño de la vivienda hasta el proyecto de ejecución. Para estas mejoras, parece conveniente interactuar con algún software del tipo BIM.

Por último, sería de gran interés utilizar los resultados tanto del análisis solar como del análisis estructural para introducirlos de manera recursiva como parámetros a tener en cuenta en el proceso de diseño. Exploraríamos de esta manera el campo de la optimización y estaríamos aprovechando la elevada capacidad de procesado de información que tiene el ordenador.

### **Cierre. Procedimiento vs. objeto**

Desde un inicio, este trabajo se plantea como investigación de un método capaz de mejorar, entre otras cuestiones, el modelo productivo de la arquitectura como profesión. Es inevitable, ante la posibilidad de llevarlo a cabo, pensar en aplicar este método hasta el extremo de sus posibilidades. Inmediatamente puede deducirse la idoneidad de vincular este sistema a una página web donde el cliente pueda introducir las variables, personalizar su vivienda, y en unos minutos imprimir toda la información necesaria para construir el proyecto. Sin embargo habrá que focalizar la atención no tanto en el objeto que ha resultado de este trabajo (el sistema) sino en el procedimiento que ha permitido llevarlo a cabo.

Dentro del sector de la construcción, la labor del arquitecto se reduce a gestionar y procesar información. Combinamos las exigencias del cliente y su contexto con nuestros conocimientos sobre la materia para obtener los planos que permiten llevar a cabo la construcción del inmueble deseado, planos que, en definitiva, no son otra cosa que información.

Tras la tesis de este trabajo fin de grado subyace otra más profunda: cada vez es más necesario que los arquitectos aprendamos a incorporar en nuestra profesión las inmensas posibilidades que la informática aporta en

materia de gestión de la información. El vocablo informática proviene del francés *informatique*, un acrónimo de las palabras *information* y *automatique* (información automática). Pretender automatizar el proceso de diseño lleva inevitablemente a recurrir a la informática como herramienta de trabajo, no solo a nivel de usuario sino también a nivel de programador.

El objetivo de este trabajo no es el sistema como objeto, sino la demostración de que este procedimiento puede llevarnos a resultados similares a los obtenidos por aquellos otros métodos que estamos acostumbrados a utilizar. La animadversión que genera comprobar que el ordenador es capaz de generar por sí solo una vivienda, se produce únicamente por considerar la informática como algo ajeno a la profesión, por la resistencia a incorporar el código informático a nuestra práctica diaria.

El aumento de la productividad es necesario por ser una característica inherente al desarrollo humano, de él dependen los niveles de confort y calidad de vida alcanzados por nuestra sociedad. Cualquier mejora de la productividad provocada por un avance tecnológico, genera en un principio grandes desequilibrios en el mercado. Sin embargo, una economía de libre competencia, unida a la labor de difusión del conocimiento que realiza la universidad como institución, permiten restablecer constantemente el equilibrio original, ocasionando en última instancia, una mejora sustancial en la calidad de vida del conjunto de la humanidad.

## **9.REFERENCIAS**

## **Bibliografía**

### Libros:

ALEXANDER Christopher (1977) *Un Lenguaje de Patrones: Ciudades, Edificios, Construcciones*. Barcelona, Gustavo Gili, 1980.

BERDINI, Paolo (1994). *Walter Gropius*. Barcelona, Gustavo Gili, 1994

DURAND, Jean-Nicolas-Louis (1805) *Précis des leçons d'architecture données à l'école polytechnique*. Paris, Chez l'Auteur

FRAMPTON, Kenneth (2001). *Le Corbusier*. Madrid, AKAL

FRAMPTON, Kenneth. (1992) *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili

JENCKS Charles, (2002) *The New Paradigm in Architecture* (Yale University Press, New Haven).

JENCKS Charles, (1986) *El lenguaje de l arquitectura moderna*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili

LE CORBUSIER (1923). *Hacia una arquitectura*. Barcelona, Apóstrofe, 1978

NEUFERT, Ernst (1936). *El arte de proyectar en arquitectura*. Barcelona, Gustavo Gili 2013

PINE, Joseph (1993). *Mass customisation: The new frontier in Business Competition*. Boston, Harvard Business School Press, 1993.

RODRIGUES, Eugenio. *Automated floor plan design. Generation, simulation and optimization*. Director: Álvaro Gomes. Universidad de Coimbra. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2014

SALAZAR, Jaime, GAUSA, Manuel (2002). *Housing + Singular Housing*. Barcelona, Actar 2002.

SALINGAROS, Nikos (2014). *Charles Jencks y el Nuevo paradigma en arquitectura*. Del libro: *Antiarquitectura y deconstrucción: el triunfo del nihilismo*. Madrid, Mairea

Artículos:

ALEXANDER, Christopher. The layout of individual houses. Publicado en *The Production of Houses*

ALEXANDER, Christopher. Features of the practice. Publicado en *a+u*.

BALTÁ, Joan. El arquitecto como artesano de lo cotidiano: Reflexiones de campo entre etnometodología y arquitectura. [International Workshop COAC Barcelona 2013]. Mayo 2013. ISBN 978-84-695-9424-7

FRACALOSSO, Igor. Clásicos de Arquitectura: *La Casa Dymaxion / Buckminster Fuller* [AD Classics: The Dymaxion House / Buckminster Fuller] 27 ago 2013

KOLAREVIC, Branco (2014). *From mass customisation to design "Democratisation"*. Publicado en *A+D*. Diciembre 2015

NOURIAN, Pirouz; REZVANI, Samaneh, SARIYILDIZ, Sevil. (2013) *A syntactic architectural design methodology: Integrating real-time space syntax analysis in a configurative architectural design process*. Publicado en Proceedings of the Ninth International Space Syntax Symposium, 2013.

PICH AGUILERA, Felipe. *El problema de la vivienda, una asignatura pendiente*. Quaderns 218, 1997

Websites:

BRAVO, Octavio. *Evolución de los procesos productivos*, 2011. <<http://www.monografias.com/trabajos89/evolucion-procesos/evolucion-procesos.shtml>> [Consulta: jueves, 28 de julio de 2016]

GARDINETTI, Marcelo. *Le Corbusier, casas Citrohan*, Tecne, 2012. <<http://tecne.com/arquitectura/le-corbusier-casas-citrohan/>> [Consulta: martes, 2 de agosto de 2016]

TECTONICA BLOG. *Sistema Moduli. Kristian Gullichsen + Jubani Pallasmaa*. [Web en línea]. <<<http://tectonicablog.com/?p=12342>> [Consulta: domingo, 28 de agosto de 2016]

THE PRITZKER ARCHITECTURE PRIZE, [Web en línea]. <<<http://www.pritzkerprize.com/2002/jury>> [Consulta: jueves, 27 de julio de 2016]



## Créditos de las figuras

**Fig 1.1.** <<http://www.elcroquis.es/Shop/Issue/Details/83?ptID=1>>

**Fig 1.2.** MURKUT, Glenn. *El Croquis 163/164 Glenn Murkut*

**Fig 2.1.** DURAND, Jean-Nicolas-Louis (1805) *Précis des leçons d'architecture données à l'école polytechnique*

**Fig 2.2.** < <http://tecne.com/arquitectura/le-corbusier-casas-citrohan/>>

**Fig 2.3.** FRACALOSSO, Igor. Clásicos de Arquitectura: La Casa Dymaxion / Buckminster Fuller

**Fig 2.4.** JENCKS Charles, (2002) *The New Paradigm in Architecture*

**Fig 2.5.** <<http://tectonicablog.com/?p=12342>>

**Fig 2.6.** <<http://23programs.blogspot.com.es/2012/07/javascript-tree-fractal.html>>

**Fig 2.7.** <<http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/17.html>>

**Fig 4.1.** Elaboración propia

**Fig 4.2.** Elaboración propia

**Fig 4.3.** RODRIGUES, Eugenio. *Automated floor plan design, generation, simulation and optimization.*

**Fig 5.1.** Elaboración propia

**Fig 5.2.** Elaboración propia

**Fig 6.1.** NEUFERT, Ernst (1936). *El arte de proyectar en arquitectura.*

**Fig 6.2.** NEUFERT, Ernst (1936). *El arte de proyectar en arquitectura.*

**Fig 6.3.** Elaboración propia

**Fig 6.4.** Elaboración propia

**Fig 6.5.** Elaboración propia

**Fig 6.6.** Elaboración propia

**Fig 6.7.** Elaboración propia

**Fig 6.8.** Elaboración propia

**Fig 6.9.** Elaboración propia

**Fig 6.10.** Elaboración propia

**Fig 6.11.** Elaboración propia

**Fig 6.12.** Elaboración propia

**Fig 6.13.** Elaboración propia

**Fig 6.14.** Elaboración propia

**Fig 6.15.** Elaboración propia

**Fig 6.16.** Elaboración propia

**Fig 6.17.** Elaboración propia

**Fig 6.18.** Elaboración propia

**Fig 6.19.** Elaboración propia

**Fig 6.20.** Elaboración propia

**Fig 6.21.** Elaboración propia

**Fig 6.22.** Elaboración propia

**Fig 6.23.** Elaboración propia

**Fig 6.24.** Elaboración propia

**Fig 6.25.** Elaboración propia

**Fig 6.26.** Elaboración propia

**Fig 6.27.** Elaboración propia

**Fig 6.28.** Elaboración propia

**Fig 6.29.** Elaboración propia

**Fig 6.30.** Elaboración propia

**Fig 6.31.** Elaboración propia

**Fig 6.32.** Elaboración propia

**Fig 7.1.** Elaboración propia

**Fig 7.2.** Elaboración propia

**Fig 7.3.** Elaboración propia

**Fig 8.1.** Elaboración propia

**Imagen de portada.** Elaboración propia



