

Diseño generativo: el estado del arte

Generative design: State of the art

Lucas García Menéndez¹, Manuel Domínguez Somonte² y María del Mar Espinosa Escudero³

Resumen

El diseño generativo es una tendencia en auge que tiene gran presencia en sectores como el diseño de producto y la arquitectura. En este estudio del estado del arte se recoge una definición precisa y completa del concepto de diseño generativo, se analizan algunas de las técnicas contenidas en este campo y se relata su estado actual de cara a productos de consumo final.

Palabras clave

Diseño generativo, optimización topológica, autómatas celulares, algoritmos genéticos, gramática geométrica, sistema-L, inteligencia de enjambre.

Abstract

Generative design is a growing trend that has a strong presence in fields such as product design or architecture. In this analysis of the state of the art, a precise and complete definition of the concept generative design is provided, some of the techniques used in this field are analysed and some already developed products are shown.

Keywords

Generative design, topology optimization, cellular automaton, genetic algorithms, shape grammar, Lindenmayer systems, swarm intelligence.

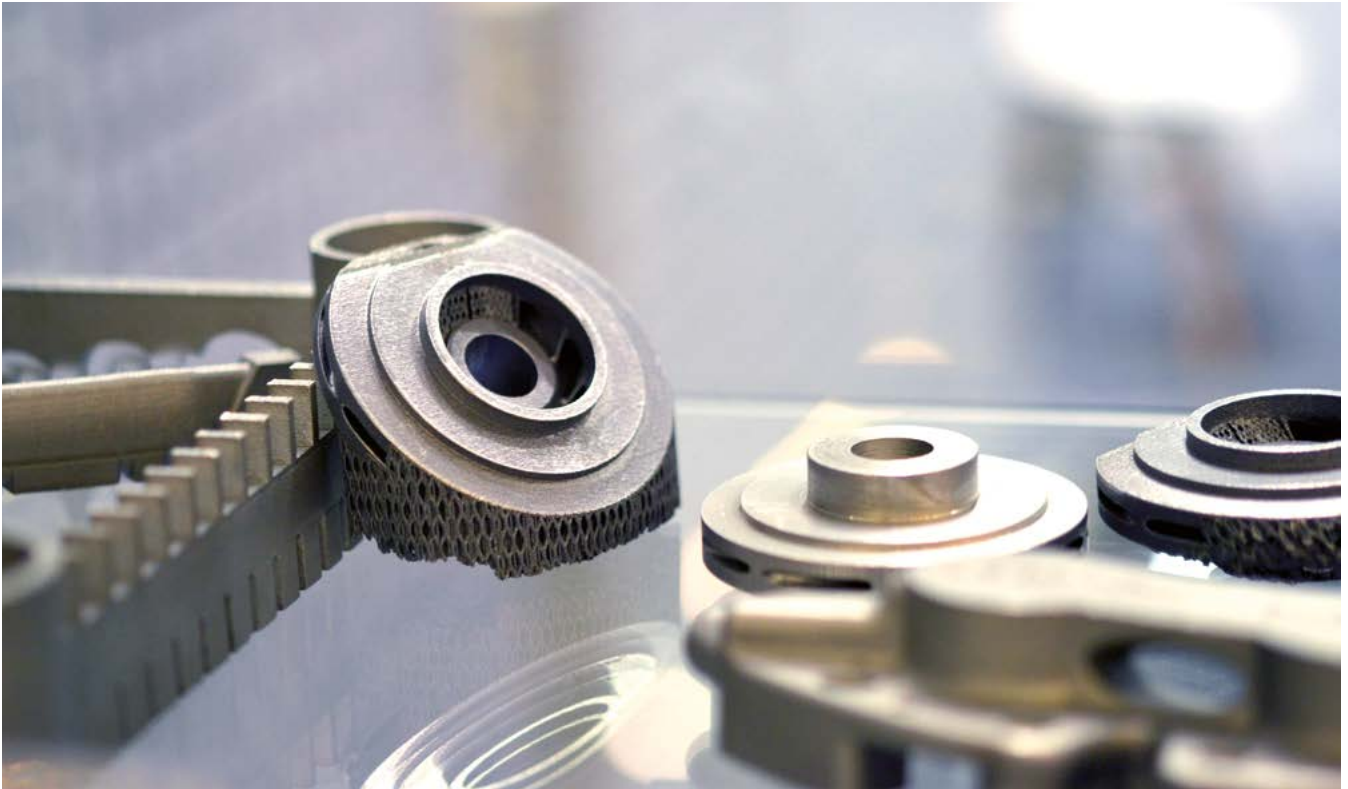
Recibido / received: 23/06/2020. Aceptado / accepted: 17/10/2020.

1. Graduado en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Oviedo (2019). Especializado en diseño mecánico y fabricación.

2. Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), en el departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación. Profesor del Máster Universitario en Ingeniería del Diseño.

3. Profesora de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), en el departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación. Profesora y coordinadora del Máster Universitario en Ingeniería del Diseño.

Autor para correspondencia: Lucas García Menéndez. E-mail: lucas.gm.796@gmail.com.



El diseño generativo ha sido factible gracias al crecimiento de la fabricación aditiva. En la imagen, piezas impresas con una impresora metálica 3d. Foto: Shutterstock.

Introducción

El diseño generativo es una nueva forma de abordar la construcción o creación de nuevos objetos. A la hora de concebir una nueva creación, el diseñador, en lugar de basarse en formas conocidas, selecciona los objetivos y las restricciones de aquello que desea diseñar y los expresa mediante parámetros básicos como la altura, el peso que debe soportar, la resistencia que debe ofrecer, etc. (Akella, 2016). A continuación, explora innumerables posibles permutaciones de una solución, generadas por la combinación de *software* de inteligencia artificial (IA) y la potencia de cálculo de la nube. De esta forma, se pueden obtener miles de soluciones al problema planteado, incluyendo formas que, sin la ayuda de estas herramientas, serían prácticamente imposibles de diseñar (Autodesk, 2018). Como se puede ver, el planteamiento del diseño generativo se aleja del paradigma más común de crear y, después, evaluar, puesto que, en lugar de preguntar: “¿Esta forma cumple con los requisitos?”, el diseño generativo se pregunta: “¿Qué forma cumple con los requisitos?”.

El diseño generativo ha tomado mucha fuerza en campos como la in-

geniería, el arte y el diseño, aunque uno de los sectores en los que está más consolidado es en la arquitectura. Por este motivo, hay definiciones muy precisas que provienen de dicho sector. Por ejemplo, Laars Hessellgren propone: “el diseño generativo no trata de diseñar un edificio, trata de diseñar el sistema que diseñe un edificio” y Kristina Shea sostiene: “los sistemas de diseño generativo tienen por objeto crear nuevos procesos que produzcan diseños espacialmente novedosos, pero eficientes y construibles mediante la explotación de las capacidades informáticas y de fabricación actuales” (Krish, 2011).

El diseño generativo y la optimización topológica tienen algunas características comunes, lo que ha provocado que ambos términos hayan sido a menudo confundidos o entremezclados. Esta ambigüedad surge porque las entradas en un proceso de diseño generativo son, en muchos casos, similares a las de las herramientas de optimización topológica (Akella, 2016). El concepto de optimización topológica es menos novedoso que el de diseño generativo. Los primeros documentos que describen la optimización topológica se remontan a prin-

cipios de la década de 1990. En 1994, Altair, empresa americana de tecnologías de la información, recibió el reconocimiento “Tecnología del Año” por OptiStruct, la primera implantación comercial de tecnología de optimización topológica (Altair, 2019). Jeffrey Brennan, director de *marketing* de Altair, definió la optimización topológica como “una metodología para obtener una distribución óptima del material para un diseño bajo unas condiciones de uso determinadas” (Altair, 2019). En definitiva, la optimización topológica es un proceso que consiste en reducir material de un objeto existente, manteniendo la función para la que ha sido diseñado.

Por tanto, hay dos diferencias fundamentales entre diseño generativo y optimización topológica:

- La optimización topológica se centra en mejorar un diseño preexistente, en rediseñar un componente que ya está concebido. En cambio, el diseño generativo crea nuevas posibilidades de diseño.

- La segunda diferencia es que el diseño generativo tiene en cuenta el propio proceso de fabricación. Esto se traduce en una drástica reducción de la secuencia de probar los productos y

volver a la fase de diseño. La optimización tradicional se centra en mejorar una solución conocida, que normalmente implica eliminar el exceso de material sin tener en cuenta cómo se va a fabricar o utilizar dicho elemento. Esto hace que, tras el proceso de optimización, se requiera modelado adicional, simulación y pruebas.

En el diseño generativo, la simulación viene implícita en el proceso de diseño. Se puede especificar el método de fabricación, como impresión 3D, CNC, fundición..., desde el principio. El *software* solo producirá diseños que se puedan fabricar mediante el método especificado (Akella, 2016).

El diseño generativo es un apartado muy amplio del diseño. Una forma de comprender más a fondo sus principales características es analizar algunas de las técnicas existentes. El cuerpo principal de este trabajo se centra en describir una selección de ellas junto con ejemplos destacados de su aplicación. En la parte final, se comenta la situación actual del diseño generativo, tanto en relación con el desarrollo de nuevo *software* como en relación con sus aplicaciones para el diseño de productos.

Procesos, técnicas y aplicaciones del diseño generativo

En todo proceso de diseño generativo se pueden distinguir tres elementos esenciales: un diseño esquema o conjunto de parámetros y algoritmos que definen lo que se quiere diseñar, un medio de crear variaciones y un medio de seleccionar resultados deseables.

Hay numerosos medios para crear variaciones en un proceso de diseño generativo, lo que da lugar a distintas técnicas dentro de este tipo de diseño. A continuación, se explican cinco de las más desarrolladas y se describen ejemplos destacados de su aplicación (Singh y Gu, 2012): el autómatas celular, los algoritmos genéticos, la gramática geométrica, sistema-L o sistema de Lindenmayer y, finalmente, la inteligencia de enjambre o sistema multiagente.

Autómata celular

Un autómatas celular (AC) consiste en un conjunto de células (unidades mínimas) situadas en una rejilla (de una, dos o tres dimensiones) y que evolucionan a lo largo del tiempo de acuerdo con

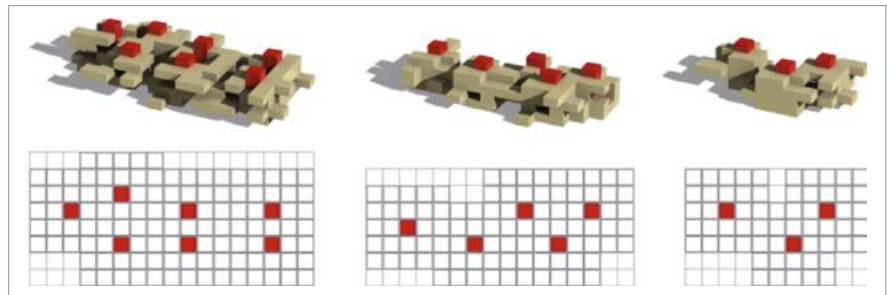


Figura 1. Tres resultados significativos obtenidos por aplicación de la técnica de diseño generativo autómatas celular (Khalili Araghi y Stouffs, 2015).

un conjunto de reglas que se definen en función del estado previo de las células vecinas, es decir, el estado de una célula, en un tiempo concreto t , depende del estado de sus células vecinas en el $t-1$.

Un ejemplo del empleo de esta técnica en la arquitectura fue la creación de edificios residenciales de alta densidad. Los tipos de células empleados en (Khalili Araghi y Stouffs, 2015) incluían unidades de paso, estudios y apartamentos de una y dos habitaciones. Dentro de este proceso de diseño generativo, se abordaron dos requisitos arquitectónicos desafiantes de los edificios de alta densidad: la accesibilidad y la luz natural.

Inicialmente, se definieron las unidades de paso, que permanecen constantes para todos los pisos. Después, el sistema asigna una configuración inicial aleatoria a cada piso. El sistema va cambiando el estado de cada célula, controlando dicho estado en términos de accesibilidad y luz natural, hasta generar resultados que cumplen con los requisitos establecidos (Khalili Araghi y Stouffs, 2015) (Fig. 1).

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos y la programación genética son técnicas inspiradas en procesos evolutivos naturales. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos, someténdola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), en función de las cuales se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados.

En el diseño, los algoritmos genéticos han sido utilizados para diversos propósitos como la optimización, la planificación de la disposición del es-

pacio y la creación de estilos de representación y formas arquitectónicas.

Gramática geométrica

Este tipo de diseños se aplica principalmente para generar formas geométricas. Fueron de los primeros sistemas algorítmicos utilizados, tanto para crear como para comprender diseños directamente a través de cálculos con formas, en lugar de indirectamente a través de cálculos con código o símbolos. Consisten en una serie de reglas que definen cómo puede ser transformada una forma existente.

George Stiny, fundador, junto con James Gips, de la gramática geométrica, define cuatro componentes básicos de una gramática geométrica: un conjunto finito de formas, un conjunto finito de símbolos, un conjunto finito de reglas de forma y una forma inicial.

Un diseño generado mediante gramática geométrica se puede ver como “elementos en relación”. La creación de diseños consiste en cambiar (añadir, sustraer o sustituir) los “elementos” y definir o alterar las “relaciones” entre ellos mediante las reglas de forma. Mediante la alteración de la secuencia de aplicación de las reglas de forma, surgen diferentes diseños que comparten un estilo similar.

Este tipo de técnicas es ampliamente utilizado en arquitectura. Una de las aplicaciones de la gramática geométrica en este sector es la gramática palladiana de G. Stiny y W. J. Mitchell (Stiny y Mitchell, 1978). El objetivo de esta gramática fue la generación de planos de villas de arquitectura palladiana (arquitectura basada en la obra de Andrea Palladio, siglo XVI, con un gusto muy marcado por el estilo clásico). En concreto, esta gramática se aplicó para generar el plano de la Villa Malcontenta (Mira, Venecia, Italia). El

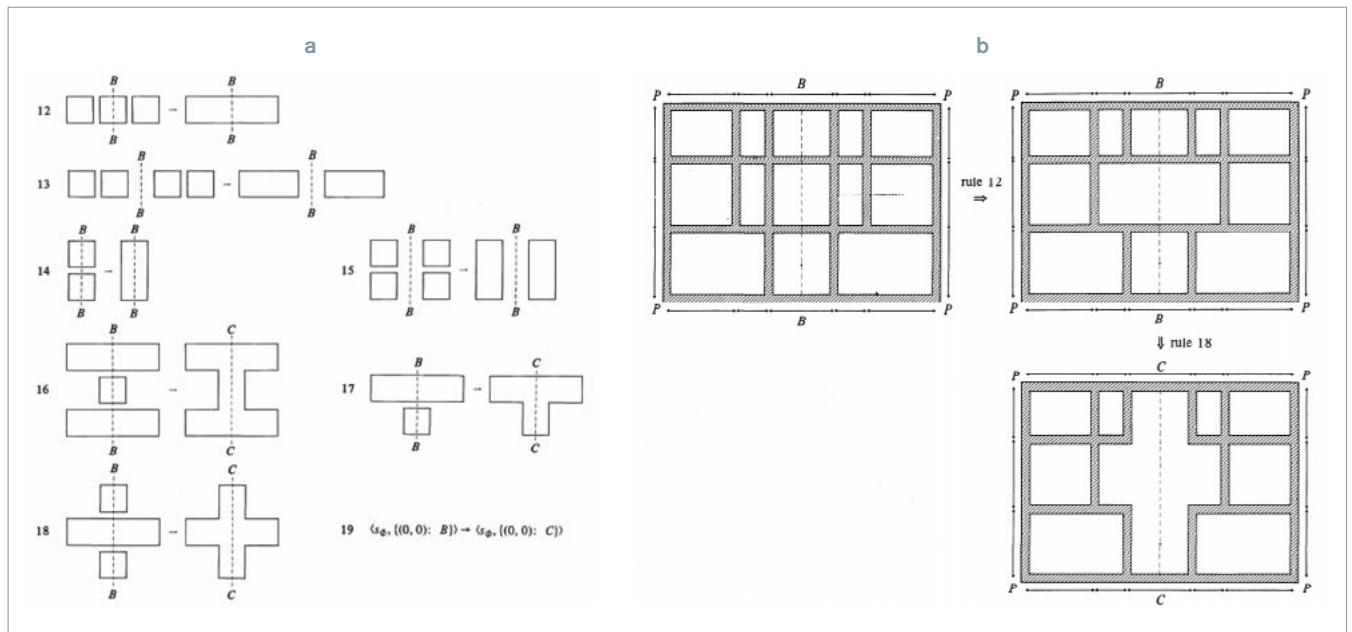


Figura 2. (a) Reglas para la distribución de las habitaciones en la gramática palladiana de Stiny y Mitchell y (b) su aplicación a la Villa Palladiana Malcontenta (Stiny y Mitchell, 1978).

primer paso fue la definición explícita del estilo de la arquitectura palladiana. Para ello, se analizaron las reglas de la arquitectura clásica descritas por Palladio en su obra *I Quattro Libri dell'Architettura*. Stiny y Mitchell refundieron partes de estas reglas arquitectónicas en una nueva gramática de una forma moderna y generativa. Las reglas creadas, en muchos casos, son traducciones directas de los cánones de diseño de Palladio; en otros casos están basadas en ejemplos de planos de villas presentes en *I quattro libri dell'Architettura*. Esta gramática generaba las características principales de la mayoría de los planos de las Villas de Palladio.

Estos planos pueden ser generados en ocho etapas que corresponden a un proceso de diseño natural e intuitivo. Las etapas se aplican en esta secuencia: (1) definición de la cuadrícula; (2) definición de la pared exterior; (3) distribución de las habitaciones; (4) reordenación de la pared exterior; (5) entradas principales-pórticos; (6) columnas de ornamentación exterior; (7) ventanas y puertas, y (8) terminaciones.

Como ejemplo concreto, vamos a analizar el conjunto de reglas para la distribución de las habitaciones en una villa rectangular. Los espacios interiores en los planos de las Villas de Palladio pueden tener forma de rectángulo, de \square , de T o de \oplus , como se puede ver en las figuras 2 y 3.

Mediante la aplicación de reglas para cada una de las ocho etapas de diseño mencionadas anteriormente, se obtienen gran variedad de planos diferentes, pero todos comprendidos dentro del estilo palladiano (Stiny y Mitchell, 1978).

Otros ejemplos de aplicaciones de la gramática geométrica para la creación de diseños pertenecientes a un cierto estilo son la gramática de los jardines mogoles (Stiny y Mitchell, 1980), la gramática de las casas de estilo de la pradera de Frank Lloyd Wright (Koning y Eizenberg, 1981) y la gramática de las casas diseñadas por el arquitecto Álvaro Siza en Malagueira (Potugal) (Pinto Duarte, 2001).

Sistema-L o sistema de Lindenmayer

En general, un sistema-L es un conjunto de reglas y símbolos utilizados principalmente para modelar el proceso de crecimiento de las plantas, aunque puede modelar también la morfología de una gran variedad de organismos. En el campo del diseño, el sistema consiste en un conjunto de reglas aplicadas de forma recursiva a elementos seleccionados, lo que da lugar a la aparición de cadenas. La diferencia entre este sistema y la gramática geométrica es que los sistemas-L representan el diseño mediante cadenas en lugar de operar directamente sobre las formas diseñadas.

Los sistemas-L están compuestos de:

- **Variables.** Elementos que pueden ser reemplazados.
- **Constantes.** Elementos que se mantienen fijos.
- **Inicio o axioma.** Cadena de símbolos que definen el estado inicial del sistema.
- **Reglas o producciones.** Conjunto de reglas que define la forma en la que las variables pueden ser reemplazadas por combinaciones de constantes y otras variables. Una producción está formada por dos cadenas (el predecesor y el sucesor). Estas reglas gramaticales de los sistemas-L se aplican iterativamente a partir de un estado inicial. Uno de los ejemplos más sencillos es el sistema-L de Lindenmayer para modelar el crecimiento de algas. En este caso, se definen los siguientes parámetros:
 - **Variables:** a, b.
 - **Constantes:** ninguna.
 - **Inicio o axioma:** a
 - **Reglas o producciones:** $(A \rightarrow AB), (B \rightarrow A)$.

Este sistema produce el resultado recogido en la figura 3.

Estos sistemas también se han empleado para la planificación y simulación virtual de ciudades muy complejas, incluyendo desde el diseño de la red primaria de carreteras hasta la construcción de edificios (Kelly y McCabe, 2006) (Parlsh y Müller, 2001).

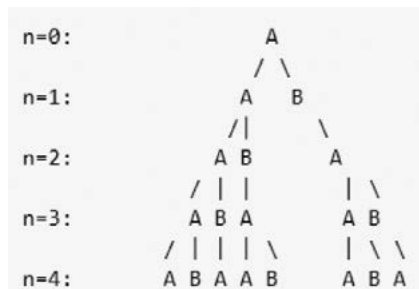


Figura 3. Resultado de la aplicación del sistema L para modelar el crecimiento de algas.

Inteligencia de enjambre y sistema multiagente

Un modelo basado en agentes (MBA) es un tipo de modelo computacional que permite la simulación de acciones e interacciones de individuos autónomos (agentes) dentro de un entorno, a la vez que permite determinar qué efectos producen dichas acciones en el conjunto del sistema. Estos agentes son capaces de actuar de forma autónoma según sus propias creencias. Además, pueden actuar de forma independiente o interactuar y comunicarse entre sí para competir o para colaborar y alcanzar colectivamente sus objetivos.

Un ejemplo de aplicación de MBA en el campo del diseño es el trabajo de Maher, Smith y Gero (Theraulaz y Bonabeau, 1995).

La inteligencia de enjambre es una rama de la inteligencia artificial que estudia el comportamiento colectivo de los sistemas descentralizados, autoorganizados, naturales o artificiales. Inspirados por la naturaleza, estos sistemas están típicamente formados por una población de agentes simples que interactúan localmente entre ellos y con su entorno. Los agentes siguen reglas simples y, aunque no existe una estructura de control centralizado que dictamine el comportamiento de cada uno de ellos, las interacciones locales entre los agentes hacen surgir un comportamiento global complejo.

El diseño generativo en la actualidad

Hoy por hoy, la mayoría de las empresas de *software* de diseño, tales como Autodesk, ANSYS, etc., están desarrollando aplicaciones basadas en diseño generativo. Una de las compañías que más ha trabajado en este ámbito es Dassault Systèmes, desarrolladora de, entre muchos otros, los programas



Figura 4. Comparación de resultados que obtener con diferentes procesos de fabricación (Dassault Systèmes, 2019).



Figura 5. Simulaciones llevadas a cabo para comprobar la resistencia de las piezas (Dassault Systèmes, 2019).

de diseño 3D SolidWorks y CATIA. Dentro de este último *software* se incluye la herramienta *Diseñador generativo (CATIA Function-Driven Generative Designer [GDE])*.

En el ámbito del diseño mecánico o diseño de producto, se emplea *software* de diseño generativo con objetivos como minimizar el peso de la pieza, maximizar la rigidez, reducir el costo u optimizar el uso del material. La aparición de nuevos materiales y procesos de fabricación (como la fabricación aditiva) hace posible la creación de geometrías que, con enfoques tradicionales, eran impensable. Sin embargo, en muchas ocasiones el coste de explorar la optimización de una pieza es prohibitivo debido a la dificultad de colaboración entre diseño, simulación y optimización. Esto hace que el proceso sufra muchos retrasos y que se originen errores en la comunicación de datos. Además, la optimización tradicional requiere expertos, ya que resulta imposible crear y validar múltiples conceptos para encontrar el óptimo.

La herramienta “diseñador generativo” del *software* CATIA responde a los retos previamente planteados y permite generar automáticamente un gran

número de piezas conceptuales a partir de unas especificaciones funcionales.

El flujo de trabajo comienza con la creación de una geometría básica (que puede ser importada desde cualquier herramienta de diseño asistido por computadora). Una comprobación de la pieza en su contexto de trabajo permite evaluar la funcionalidad de la misma. A continuación, se definen las especificaciones incluyendo el material, el espacio asignado, las cargas a las que va a estar sometida, el proceso de fabricación deseado, etc. El *software* genera una geometría optimizada en función de las especificaciones previamente definidas. A continuación, se crea un gran número de variaciones de dicha geometría. Se realizan simulaciones para garantizar que la resistencia y las deformaciones de la pieza están dentro de tolerancia y, una vez validada por el diseñador, la forma conceptual se transforma en un modelo que pueda ser fabricado (bien mediante fabricación aditiva o mediante procesos de fabricación tradicionales). De esta forma se integran las fases de diseño, simulación y optimización (Dassault Systèmes, 2019) (Figs. 4 y 5).

El diseño generativo ha sido factible gracias al crecimiento de la fabri-



Figura 6. Silla A.I (Schwab, 2019).

cación aditiva, sector que, en la actualidad, todavía tiene un largo camino por recorrer antes de alcanzar niveles de producción iguales a las técnicas de fabricación tradicionales utilizadas en la producción en masa (Keane, 2018).

Cabe destacar que el diseño generativo se ha consolidado en sectores como el aeroespacial. Sin embargo, todavía es difícil encontrar en el mercado productos ordinarios de consumo final concebidos mediante técnicas de diseño generativo. Existen multitud de prototipos y ejemplos teóricos, como la potencia de una bicicleta diseñada con Dreamcatcher (sistema de diseño generativo desarrollado por Autodesk) (Wang, 2016) o los componentes para coches diseñados por General Motors (GM) en colaboración también con Autodesk (Alderton, 2018), pero, como decimos, apenas existen productos comerciales. Una excepción es la silla A.I. (Schwab, 2019), creada por el diseñador francés Philippe Starck en colaboración con la empresa de muebles Kartell, que se fabrica en masa desde 2019. Esta silla se diseñó para que empleara la mínima cantidad de material posible y para ser fabricada mediante moldeo por inyección (Fig. 6).

Conclusiones

A menudo, el término “diseño generativo” se usa de forma errónea o tergiversada. Por eso, se ha intentado dar una visión clara sobre qué es y qué no es el diseño generativo. Concretamente, se han remarcado las diferencias entre diseño generativo y optimización topológica, técnicas que, a pesar de compartir características, no son

iguales. En resumen, la optimización topológica tiene como objetivo mejorar un diseño existente, mientras que “diseño generativo” no necesita un diseño de partida, sino que engloba el proceso de creación de principio a fin.

Al abordar la definición de diseño generativo se explicó cómo, mediante la combinación de *software* de inteligencia artificial (IA) y potencia de cálculo de la nube, se crea un gran número de respuestas que responden a los objetivos inicialmente planteados. Estas respuestas son generadas mediante diversas técnicas. Abundan las publicaciones en las que se aplican las técnicas existentes individualmente, pero es difícil encontrar artículos que las comparen entre sí. En este estudio del estado del arte se han explicado, de forma superficial, cinco de las técnicas más desarrolladas de diseño generativo: el autómata celular, los algoritmos genéticos, la gramática geométrica, el sistema-L o sistema de Lindenmayer y la inteligencia de enjambre o sistema multiagente.

Cada vez son más los sectores que incluyen el diseño generativo dentro de su flujo de trabajo en el desarrollo de productos. Gracias a los avances en campos como el aprendizaje de máquinas, la computación en la nube y la fabricación aditiva, el diseño generativo desempeñará un papel clave en el diseño y la fabricación del futuro.

Referencias

Akella, R. (2016). What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing, Industry Week. Disponible en: <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/what-generative-design-and-why-its-future-manufacturing>. (Consultado el 18 de junio de 2020).

- Alderton, M. (2018). Driving a lighter, more efficient future of automotive-part design at GM. Disponible en: <https://www.autodesk.com/redshift/automotive-design/>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Altair (2019). Generative Design and Topology Optimization. Disponible en: <https://web.altair.com/generative-design-report>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Autodesk (2018). Generative Design. Disponible en: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Dassault Systemes (2019). 3DEXPERIENCE CATIA Function-Driven Generative Designer. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ZE2I2GKscH0&t=270s>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Keane, P. (2018). Generative Design: The Road to Production. Disponible en: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/16973/Generative-Design-The-Road-to-Production.aspx>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Kelly, G. y McCabe, H. (2006). Interactive generation of cities for real-time applications, *ACM SIGGRAPH 2006 Research Posters, SIGGRAPH 2006*. doi: 10.1145/1179622.1179673.
- Khalili Araghi, S. y Stouffes, R. (2015). Exploring cellular automata for high density residential building form generation, *Automation in Construction*. Elsevier B.V., 49(PA), pp. 152-162. doi: 10.1016/j.autcon.2014.10.007.
- Krish, S. (2011). What is Generative Design? Disponible en: <https://generativedesign.wordpress.com/2011/01/29/what-is-generative-design/#more-1314>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Koning, H. y Eizenberg, J. (1981). The Language of the Prairie: Frank Lloyd Wright's Prairie Houses, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 8(3), pp. 295-323. doi: 10.1068/b080295.
- Parish, Y. I. H. y Müller, P. (2001). Procedural Modeling of Cities. En *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 301-8. SIGGRAPH '01. New York, NY, USA: ACM.
- Pinto Duarte, J. (2001). *Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses*. Massachusetts Institute of Technology.
- Schwab, K. (2019). This is the first commercial chair made using generative design, Fast Company. Disponible en: <https://www.fastcompany.com/90334218/this-is-the-first-commercial-product-made-using-generative-design>. (Consultado el 18 de junio de 2020).
- Singh, V. y Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework, *Design Studies*. Elsevier Ltd, 33(2), pp. 185-207. doi: 10.1016/j.destud.2011.06.001.
- Stiny, G. y Mitchell, W. J. (1978). The Palladian grammar, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 5, pp. 5-18. doi: 10.1068/b050005.
- Stiny, G. y Mitchell, W. J. (1980). The grammar of paradise: on the generation of Mughul gardens, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 7, pp. 209-226. doi: 10.1068/b070209.
- Theraulaz, G. y Bonabeau, E. (1995). Modelling the collective building of complex architectures in social insects with lattice swarms, *Journal of Theoretical Biology*, 177, pp. 381-400. doi: 10.1006/jtbi.1995.0255.
- Wang, C. (2016). Algoritmos conscientes: el nuevo papel del diseñador en diseño generativo. Disponible en: <https://ethnographymatters.net/es/blog/2016/06/17/mindful-algorithms-the-new-role-of-the-designer-in-generative-design/>. (Consultado el 18 de junio de 2020).