

# HÁBITAT, VIVIENDA Y CONSTRUCCIÓN 4.0

Jesús Anaya Díaz | Silvia Arias Orozco | Catherine Arroyo Aguilar |

David Carlos Ávila Ramírez | Luis Borunda Monsiváis |

Fernando Córdova Canela | Yokasta García Frómata |

Dulce Esmeralda García Ruiz | Jaime Francisco Gómez Gómez |

Francisco Javier González Madariaga | Enrique Herrera Lugo |

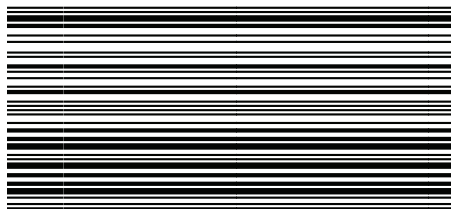
Manuel Ladrón de Guevara | Julio Peña | Gilkauris Rojas Cortorreal |

Gilberto Velázquez Angulo | Alejandra Villagrana Gutiérrez |

[Francisco Javier González Madariaga, Fernando Córdova Canela y Jaime Francisco Gómez Gómez, coordinadores]



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA  
Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño



# HÁBITAT, VIVIENDA Y CONSTRUCCIÓN 4.0

*Jesús Anaya Díaz | Silvia Arias Orozco | Catherine Arroyo Aguilar |*

*David Carlos Ávila Ramírez | Luis Borunda Monsiváis |*

*Fernando Córdova Canela | Yokasta García Frómata |*

*Dulce Esmeralda García Ruiz | Jaime Francisco Gómez Gómez |*

*Francisco Javier González Madariaga | Enrique Herrera Lugo |*

*Manuel Ladrón de Guevara | Julio Peña | Gilkauris Rojas Cortorreal |*

*Gilberto Velázquez Angulo | Alejandra Villagrana Gutiérrez |*

[Francisco Javier González Madariaga, Fernando Córdova Canela y Jaime Francisco Gómez Gómez, coordinadores.]



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Dr. Ricardo Villanueva Lomelí / Rector General

Dr. Héctor Raúl Solís Gadea / Vicerrector Ejecutivo

Mtro. Guillermo Arturo Gómez Mata / Secretario General

CENTRO UNIVERSITARIO DE ARTE, ARQUITECTURA Y DISEÑO

Dr. Francisco Javier González Madariaga / Rector

Mtra. María Dolores del Río López / Secretario Académico

Dr. Everardo Partida Granados / Secretario Administrativo

Diseño editorial: Rodolfo Sánchez Gómez

Imagen en portada: proyecto de construcción de vivienda y comunidades sustentables mediante impresión 3D de materiales arcillosos, Shamballa de WASP IBERIA, Gianluca Pugliese y WASP.

Primera edición, 2020

DR © Universidad de Guadalajara, 2020

Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño

Calzada Independencia Norte núm. 5075

Huentitán El Bajo, CP 44250

Guadalajara, Jalisco, México

ISBN 978-607-571-041-9

La presente obra fue dictaminada por el Consejo Editorial del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Guadalajara. Esta obra no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, por ningún medio conocido o por conocer, sin el permiso previo y por escrito del titular del derecho de autor.

<b>Introducción</b>	9
<b>Automatización de la construcción: oportunidades y retos hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible</b> <i>Luis Borunda Monsiváis   Manuel Ladrón de Guevara   Gilberto Velázquez Angulo   Jesús Anaya Díaz</i>	13
<b>De la Industria 4.0 hacia la Construcción 4.0: una oportunidad de crecimiento</b> <i>Jaime Francisco Gómez Gómez   Francisco Javier González Madariaga   Enrique Herrera Lugo</i>	41
<b>La modelación de sistemas dinámicos para el monitoreo y gestión de recursos en edificios: propuesta de modelo sustentable de vivienda de interés social en el Área Metropolitana de Guadalajara</b> <i>Alejandra Villagrana Gutiérrez</i>	57
<b>Monitoreo de la eficiencia energética en edificios administrativos para la educación superior</b> <i>Silvia Arias Orozco</i>	73

<b>Aporte de los programas informáticos de eficiencia energética y ambiental en la construcción de edificaciones para la Construcción 4.0</b> <i>Yokasta García Frómata   Gilkauris Rojas Cortorreal   Julio Peña</i>	93
<b>Enfoques eco-tecnológicos del desarrollo sustentable y la vivienda social</b> <i>David Carlos Ávila Ramírez</i>	119
<b>La robótica en la construcción como medio para reducir costos en la vivienda de interés social en México</b> <i>Dulce Esmeralda García Ruiz   Catherine Arroyo Aguilar</i>	141
<b>Construcción 4.0, explorando nuevas propuestas académicas de incidencia desde la universidad pública en México</b> <i>Fernando Córdova Canela</i>	169

## Introducción

La presente obra constituye un primer esfuerzo coordinado desde el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño (CUAAD) de la Universidad de Guadalajara por abordar el complejo desarrollo del concepto Industria 4.0 y su aplicación subsidiaria en el sector de la construcción mediante la denominada Construcción 4.0, teniendo como principal objetivo el de permitir que los lectores especializados en las disciplinas relacionadas con la arquitectura, el diseño y el urbanismo tengan una herramienta tanto teórico-conceptual como de resultados de investigación aplicada que perfile cómo se desarrolla poco a poco la interpretación y la adaptación de la Construcción 4.0 de manera general en la producción del hábitat y, particularmente, de la vivienda.

Frente a un mundo globalizado en el que aparentemente priva la noción de determinismo tecnológico, la cual parece obligarnos a seguir incondicionalmente los estándares y regulaciones que surgen desde los países altamente industrializados, los trabajos aquí desarrollados plantean una visión crítica que obliga a reflexionar acerca del significado y la forma en que es interpretado y adoptado en nuestro país, incluyendo una experiencia latinoamericana, en lo general, el concepto de Industria 4.0 y, en lo particular, la Construcción 4.0, además de proponer, en algunos casos, directamente el papel que podrían jugar las instituciones de educación superior en este proceso.

El contenido del documento se articula en tres secciones temáticas, que en su conjunto tratan de visualizar aportaciones significativas desde la perspectiva del desarrollo teórico-conceptual y de investigación aplicada, comenzando

por los alcances conceptuales y oportunidades, para después exponer las aplicaciones en el hábitat y la vivienda, y culminar en la exploración de nuevos escenarios y entornos desde nuestra experiencia nacional. Adicionalmente podríamos decir que cada sección mantiene una carga específica de aspectos teórico-conceptuales y de investigación aplicada: en el caso de la primera, el énfasis teórico-conceptual es evidente; en la segunda, se enfatiza la investigación aplicada, y la tercera propone exploraciones tanto teórico-conceptuales como de investigación aplicada como senderos que podrían transitarse en el futuro próximo.

La primer sección, de alcances conceptuales, incluye dos capítulos, el primero trata la automatización de la construcción y su relación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), en la cual se presenta una revisión de los marcos teóricos actuales, las prácticas de fabricación y los desafíos en la automatización de la construcción, y presenta una aproximación al potencial para alcanzar algunos ODS a través de casos de estudio vinculados al uso de tecnologías de ensamblaje de elementos por brazos robóticos e impresión 3D de gran escala. El segundo capítulo presenta algunas prácticas asociadas al concepto Industria 4.0 que tienen el potencial de apuntalar el concepto de Construcción 4.0. Se parte del análisis de lo que implica el concepto Industria 4.0 y se aborda el estudio de caso de un megaproyecto como antecedente de estas prácticas en la proyectación y la construcción, como lo es el Pez Dorado de la Villa Olímpica de Barcelona, proyectado por la firma Gehry Associates, para posteriormente hacer una breve revisión de algunas otras tecnologías asociadas a las prácticas actuales y cuáles son sus posibles beneficios en la construcción.

La segunda sección de aplicaciones en el hábitat y la vivienda está compuesta por tres capítulos de investigación aplicada; los tres capítulos abordan la simulación como elemento más común de adaptación de la Construcción 4.0; el primer capítulo apunta hacia la explicación de la conceptualización y estructuración de un modelo de vivienda sustentable dentro del Área Metropolitana de Guadalajara a partir de la integración de sistemas dinámicos para el monitoreo y gestión de recursos hídricos dentro de la misma, en donde la modelación pretende explicar el comportamiento de la infraestructura hídrica en la vivienda de interés social, primeramente bajo una perspectiva convencional, y, posteriormente, desde un escenario sustentable a partir del *software*

STELLA. El segundo capítulo analiza, mediante simulaciones, las condiciones de consumo de energía en las instalaciones administrativas y educativas, tomando como ejemplo el diagnóstico del espacio físico del Edificio Cultural y Administrativo de la Universidad de Guadalajara, para lo cual se vale del sistema de simulación virtual denominado «The Urban Modeling Interface» (UMI), el cual es un programa basado en la plataforma de «Rhinoceros», y que permite, a partir del análisis de las características morfológicas, la disposición de modelos tridimensionales del proyecto o de la construcción misma, desarrollar una serie de evaluaciones del comportamiento del edificio, para establecer los consumos energéticos y posibles medidas de ahorro. El tercer capítulo de la sección plantea un análisis energético a partir del *software DesignBuilder* aplicado a un caso de estudio representativo de las viviendas típicas en clima cálido-húmedo, para con esto establecer estrategias de mejoras pasivas, además de sugerir con un enfoque crítico las condiciones para seleccionar una herramienta adecuada de evaluación de la eficiencia energética y ambiental, y extrae conclusiones de todas las herramientas analizadas en el estudio.

La última sección aborda los nuevos escenarios y entornos de Construcción 4.0 en el hábitat y la vivienda desde la experiencia mexicana; aquí se exploran, desde diferentes perspectivas, estos escenarios, uno centrado en el cambio tecnológico en la vivienda, el cual es un tema subyacente en el proceso de adaptación e interpretación de la Construcción 4.0 en la vivienda, y que se expone en el primer capítulo al explorar teóricamente los diferentes enfoques vinculados al cambio tecnológico en la vivienda social en México, por lo que pretende establecer la relación entre el diseño tecnológico de la vivienda social y la sustentabilidad; el segundo, que propone explorar desde la investigación aplicada el cambio tecnológico en la producción de vivienda social orientándola hacia el uso de recursos robóticos, para terminar con un primer escenario comparativo de análisis de costos. El tercer capítulo examina el desarrollo de nuevas propuestas académicas relacionadas con la Construcción 4.0 desde la universidad pública en México, haciendo una primera aproximación conceptual vinculada con el desarrollo de una nueva propuesta académica para el CUAAD de la Universidad de Guadalajara, que parta de la incorporación del concepto Construcción 4.0, tanto en la adecuación como el desarrollo de nuevos programas académicos y de una estructura organizacional en red que articule la infraestructura tecnológica



y la investigación hacia la incidencia con un enfoque de producción social del hábitat, valiéndose del análisis crítico tanto del concepto de Industria 4.0 como de experiencias nacionales e internacionales relevantes que están relacionadas con la implantación de la Industria 4.0 y Construcción 4.0.

En síntesis, los contenidos propuestos abonan, por un lado, a mejorar el entendimiento de los alcances teóricos del concepto de Construcción 4.0 y, por otro, para tener una primera aproximación al incipiente desarrollo y entendimiento que desde la investigación aplicada se tiene de manera general de dicho concepto, principalmente en nuestro país, en disciplinas tales como la arquitectura, el diseño y el urbanismo, proponiendo de esta manera una mirada alternativa a la ola de determinismo tecnológico que parece acompañar al desarrollo de la también llamada Cuarta revolución industrial.

# Automatización de la construcción: oportunidades y retos hacia los objetivos de desarrollo sostenible

*Luis Borunda Monsiváis  
Manuel Ladrón de Guevara  
Gilberto Velázquez Angulo  
Jesús Anaya Díaz*

## Introducción

La predicción del aumento de la población mundial demanda repensar las actuales prácticas de construcción para reducir el impacto negativo derivado de ellas. Con las herramientas informacionales actuales, el rol de la industria en la tarea de entrega de soluciones sostenibles para abordar los retos de hábitat está cambiando mediante un proceso de digitalización hacia la Construcción 4.0.

Una sociedad cada vez más digital (Negroponte, 1995) conlleva el desarrollo de métodos computacionales y la ineludible digitalización y transformación de la industria (Kelly, 2016).

La fabricación digital, aspecto fundamental para la automatización de los procesos constructivos, nace con la reciente posibilidad de vincular los diseños virtuales con su producción física, mediante herramientas controladas por ordenadores, descendientes del primer Molino por Control Numérico (Gershensfeld, 2012). La digitalización de diversas industrias de manufactura demostró aumentar enormemente su productividad en los últimos años; sin embargo, en el caso de la construcción, su racionalización y digitalización requiere aún el desarrollo de sistemas automatizados y robotizados (Bock, 2008). La industria de la construcción aún no ha visto un despliegue significativo de medios robóticos debido a su inherente complejidad, a causa de los entornos variables y la singularidad de la ejecución de cada uno de los trabajos.

Actualmente, la automatización de la construcción muestra importantes potenciales de aumento de la productividad gracias a los años de desarrollo técnico y experimentación, aunque no es un campo particularmente nuevo. Acercamientos al problema de establecer algoritmos de Control Numérico (CNC) en la construcción por robots tampoco es reciente (Haas *et al.*, 1995; Warszawski, 1984) y gracias a los avances recientes en computación y robótica, se están habilitando su implementación a gran escala (De Soto *et al.*, 2018).

Durante medio siglo, en arquitectura y construcción, la digitalización y la automatización han venido transformado profundamente la manera en la que diseñamos. La aparición de producción digital de planos en los años sesentas, la innovación del medio de visualización en los años ochentas, el advenimiento de estudios de arquitectura «*paperless*» enteramente digitales en los años noventas, y, actualmente, la transformación de la manera en la que construimos (Malé, 2016), son algunos ejemplos. Al alcance, tenemos un entorno de construcción robotizado (Bock, 2015), que vincula la impresionante precisión de los robots (Hack *et al.*, 2014) con el poder de cálculo del diseño computacional (Lynn, 1993). En este escenario, es viable la producción en masa de edificación personalizada (Carpo, 2017), de cualidades complejas (Dillenburger y Hansmeyer, 2013) y económicamente viable (De Soto *et al.*, 2018). La resultante reducción de residuos de construcción, significativos potenciales de customización, la mejora en la huella ecológica y la mejora de las condiciones de trabajo en entornos de riesgo se encuentran entre los principales potenciales de la automatización de la construcción para abordar los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

### **El cambio en el pensamiento de diseño: de espacio análogo a espacio digital**

El uso de lenguajes de programación en diseño abre territorios previamente inexplorados e impracticables. Cuando en los años noventas el lenguaje de continuidad y sin costuras reunía toda la atención de la especulación e investigación arquitectónica, y establecía en la CNC su estandarte de fabricación, hoy en día, el lenguaje de lo discreto, de fragmentos y partículas parece haber tomado

relevancia en el mundo de la investigación con la impresora 3D como bandera en manufacturación (Carpo, 2017).

Estos lenguajes no aparecen de manera aleatoria y caprichosa, sino que son producto del momento tecnológico computacional en el que vivimos. En los años noventas, gracias al nacimiento de softwares CAD, la curva en arquitectura dejó de ser un problema, de tiempo y complejidad para el diseño. Gracias al advenimiento del CAM, la curva se puede fabricar de manera simple, precisa y sin un coste extra. En el momento que la curva alcanza el mismo status que la línea, se empieza a ver un auge en edificios en los que las superficies curvadas no constituyen momentos puntuales, sino que empiezan a formalizar un nuevo lenguaje.

Saltándonos la década de los dos miles, donde el parametricismo (Schumacher, 2009) se impone como lenguaje en escuelas y estudios de arquitectura, y cuya relevancia es algo menor que la curva en los años noventas, la investigación en arquitectura y herramientas tecnológicas en la década del dos mil diez abandona la suavidad de las curvas por la discontinuidad de las partículas. Esta nueva corriente de pensar en arquitectura tiene principalmente un motivo: la introducción de lenguajes de programación en el diseño. La arquitectura utiliza, por primera vez, herramientas propias de las ciencias de la computación. El hecho de que por primera vez en la historia no diseñamos mediante un *feedback* puramente visual (Oxman, 1999), cambia el modo de entender e interpretar el diseño arquitectónico. Con la programación, la forma puede ser substituida por datos en el proceso de diseño, es decir, ya no manipulamos la representación geométrica de la forma, sino estructuras de datos. Más bien, la representación geométrica es consecuencia del diseño de algoritmos, y es usada como verificación de los datos que manipulamos. Esto tiene una repercusión enorme, ya que, por primera vez, el arquitecto puede aprender a pensar en términos computacionales, y tomar decisiones algorítmicamente.

En un enfoque más técnico, el arquitecto diseña en un espacio tridimensional que se ve relleno por puntos, líneas o superficies, por mencionar algunos arquetipos geométricos. Este espacio 3D es un espacio digitalizado, en el que reproducimos objetos con propiedades físicas. Es importante entender que, cuando hablamos de diseño a través de lenguajes de programación, el espacio 3D pasa de ser un espacio digitalizado a un espacio digital. Es digital porque un punto no únicamente es una referencia geométrica, sino que es un índice de in-

formación, un set ordenado de datos al que podemos acceder, con coordenadas x, y, z. Este índice puede tener tanta información como capacidad computacional tenga la herramienta donde trabajamos (Ladrón de Guevara *et al.*, 2019).

### Naturaleza de la construcción robótica: diseño digital

La revolución informacional en la que nos encontramos inmersos (Rifkin, 2014) está alcanzando el mundo material a través de la fabricación digital, de la transformación digital del mundo físico (Gershenfeld, 2008). El procesador es a la revolución digital lo que la máquina de vapor es a la revolución industrial (Gaja, 2003). Esta transformación propone una serie de preguntas: ¿Cómo esta tecnología transforma las prácticas de construcción contemporáneas? Y, en particular, ¿qué tipo de cambios se introducen en la forma en que pensamos, desarrollamos y construimos arquitectura?

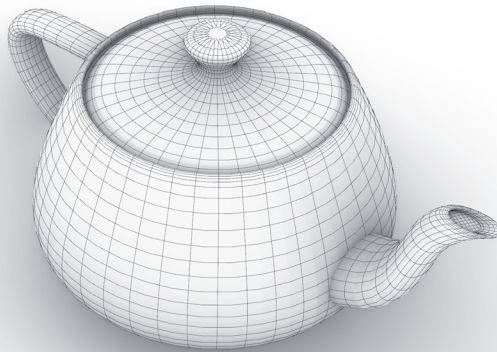


Figura 1. Modelo digitalizado, curvas NURBS describen la superficie o «piel» de una tetera. Elaboración propia.

Las nuevas tecnologías de diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación asistida por computadora (CAM) están desafiando las prácticas de diseño

tradicional (Menges y Ahlquist, 2011) desarrollando un cuerpo de investigación y práctica en arquitectura digital (Oxman y Oxman, 2014). Al conectar el diseño computacional con la fabricación, CAD ya no es un equivalente analógico a «redacción asistida por computadora», sino que se convierte en un impulsor principal, un verdadero «asistente» computarizado, de intención de diseño (Negroponte, 1975), tal como fue concebido originalmente (Cardoso, 2015). Las prácticas actuales de diseño digital implican no solo una aproximación geométrica al objeto digital como en el CAD anterior, sino también una verdadera construcción digital del objeto (Kolarevic, 2003), podemos definir, simular, optimizar y constituir virtualmente un concepto digital para su posterior fabricación digital.

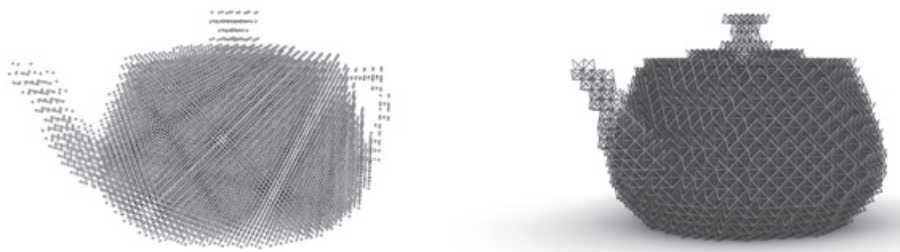


Figura 2. Modelo digital, discretización estructurada con 11,600 muestras del volumen de una tetera. Elaboración propia.

La digitalización del diseño y la construcción implica la transformación de los planos analógicos de «diseño y construcción» para la fabricación y la producción, en la implementación de flujos de trabajo «CAD-CAM» de diseño digital y producción automatizada. Esta metodología de trabajo basada en lo digital es fundamentalmente ajena a la industrialización. La producción de arquitectura a través de la manipulación de tipologías emerge con la anterior industrialización y, en consecuencia, requiere una actualización para incorporarse en la metodología que plantea la revolución informacional en la que estamos inmersos (Rifkin, 2014). La tipología plantea un escenario de repetición industrializable de modelos (Rossi, 1982), el modelo digital es un algoritmo, y plantea un escenario de personalización, basado en familias e instancias (Lynn y Kelly, 1999).

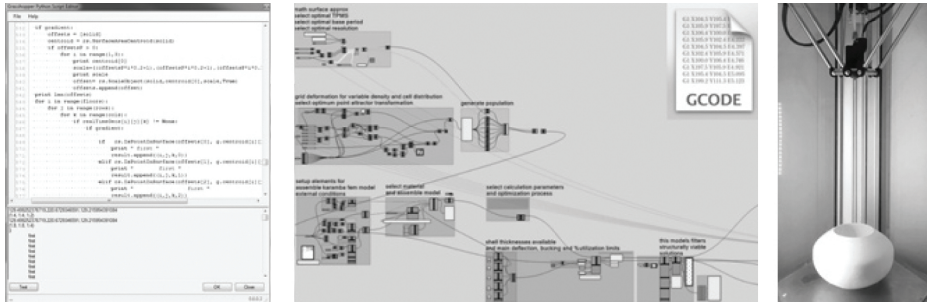
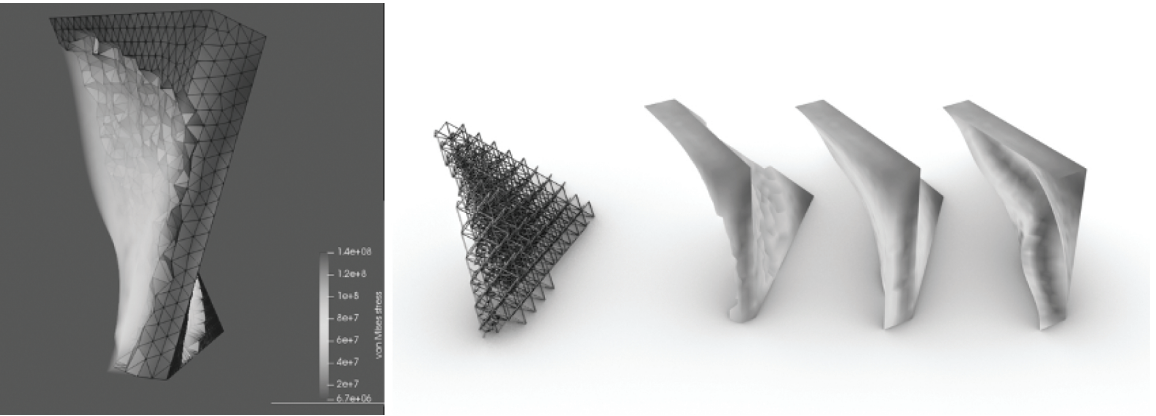


Figura 3. Interfaces de diseño algorítmico para la instanciación y producción de una tetera. Elaboración propia.

## Fabricación digital

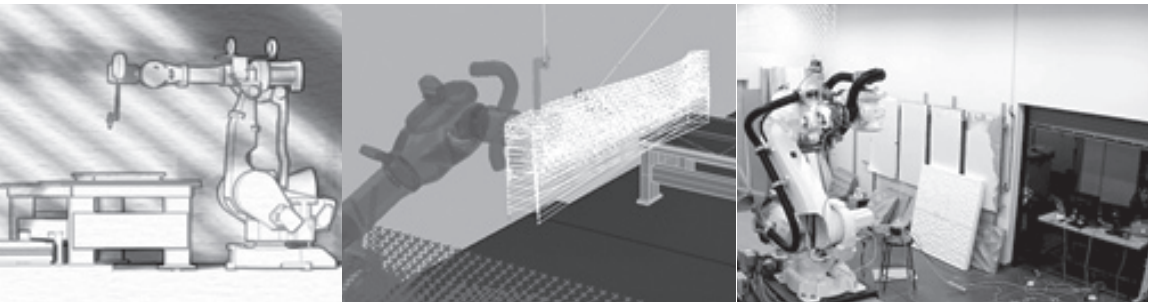
La construcción robótica requiere de la producción de un conjunto codificado de instrucciones de manufactura a partir del modelo digital; por lo tanto, exige la caracterización de las metodologías de diseño digital y las técnicas de fabricación digital para una implementación adecuada en la práctica de la arquitectura (Gramazio *et al.*, 2014). Para construir robóticamente, el trazado de planos es innecesario. El dibujo está compuesto por un código y ofrece la posibilidad de indexación, accediendo, organizando y caracterizando el modelo incorporando unidades discretas de información (Oxman y Rosenberg, 2007).

La arquitectura fabricada digitalmente se planifica, evalúa y optimiza a través de la simulación en entornos virtuales y bucles de retroalimentación durante la fase de diseño, entendiendo la construcción como parte integral del diseño (Willmann *et al.*, 2013). Una vez que se define un modelo digital, la información de la geometría y las calidades de los materiales se vuelven fácilmente accesibles y facilitan la interpretación para la creación de instancias de escenarios de fabricación específicos. Este procedimiento se compone de procesos de formación, sustracción y aditivos ejecutados por máquinas a través de instrucciones codificadas (Malé, 2016). Todas las coordenadas e instrucciones quedan encajadas en el código, de modo que el robot puede ejecutar las tareas mediante señales electromecánicas.



.....

Figura 4. Constitución digital de una membrana mediante la caracterización de unidades discretas en un modelo procesado por análisis de elementos finitos (FEA) para la diferenciación local en función de la resistencia. Elaboración propia.



.....

Figura 5. El entorno virtual del laboratorio de fabricación, DFab - Carnegie Mellon University, permite la simulación y verificación de procesos de fabricación robótica. Elaboración propia.

Dado que el impacto de los procesos de fabricación digital es insignificante en comparación con el proceso de fabricación de materiales, cualquier ahorro en el uso de materiales corresponde a una reducción en el impacto ambiental general de la construcción (Agustí y Habert, 2017). Además, el uso de tales técnicas de fabricación digital muestra mejoras significativas en las prácticas de



construcción actuales y el potencial de abordar varios objetivos de desarrollo sostenible, particularmente en temas relacionados con:

- Uso eficiente del material.
- Seguridad y especialización en la construcción.
- Gestión de entornos complejos.

Los precursores de procesos robóticos como (Maeda, 1994), ya lograron reducir hasta el 70 por ciento de los desechos de construcción y alrededor del 50 por ciento de la mano de obra en el sitio (Bock, 2008). El principal problema para la implementación en masa es que los procesos robóticos se aplican con mayor facilidad en condiciones de laboratorio, donde se requiere un método repetitivo confiable. En cambio, las aplicaciones complejas a gran escala, como la construcción, han resultado ser un reto significativo (Kohler, 2014), pero el cuerpo de investigación y aplicación de la robótica de construcción a gran escala está aumentando exponencialmente (Chen *et al.*, 2018).

## Mecanismos

El aspecto clave en el diseño digital para la fabricación robótica es la capacidad de comunicación de un conjunto de sistemas electromecánicos a través de señales digitales. Esto permite que un procesador organice, detecte y actúe las instrucciones para el control numérico.

Las máquinas NC combinan una herramienta maniobrable motorizada y, a menudo, una plataforma maniobrable motorizada, ambas controladas por un núcleo de computadora, de acuerdo con instrucciones de entrada específicas.

Actualmente, cualquier tipo de código que opere al grupo de máquinas para realizar un conjunto de tareas incluye las instrucciones de todas las operaciones de forma lineal. Cada tipo de máquina puede operar en diferentes lenguajes de código, pero son comunes en el funcionamiento a través de Salidas Digitales y Entradas / Salidas Digitales; estas entradas permiten la coordinación de las diferentes máquinas al interpretar las señales digitales de bajo voltaje para accionar mecanismos especializados.

El mecanismo robótico puede ser especializado para llevar a cabo una tarea única, como era común para los instrumentos en sistemas pioneros, o dividir el instrumento en un mecanismo de propósito general y un mecanismo de herramientas separado. Dado que cualquier componente en particular puede requerir el uso de varias herramientas diferentes, las máquinas modernas a menudo combinan múltiples herramientas en una sola «celda». Actualmente se investiga una amplia gama de iniciativas robóticas singulares que se están aplicando con éxito en la construcción. Se presentan varios mecanismos robóticos:

### Brazos robóticos

Con seis grados de libertad (DoF), el brazo robótico posiciona y acciona la herramienta de fin de brazo, «End of Arm Tooling» (EOAT), y la herramienta de mecanizado realiza una tarea específica. La comunicación entre el robot y el mecanismo EOAT requiere de un accionamiento digital o mecánico. El accionamiento digital se realiza mediante la interpretación en un procesador de señales débiles programadas dentro del recorrido de deposición del robot. El procesador interpreta las señales débiles accionando cada uno de los componentes electromecánicos de la EOAT. La imagen muestra el sistema de extrusión personalizado y el diagrama de comunicación mediante señales débiles de *physical computing* desarrollado para la plataforma Arduino.

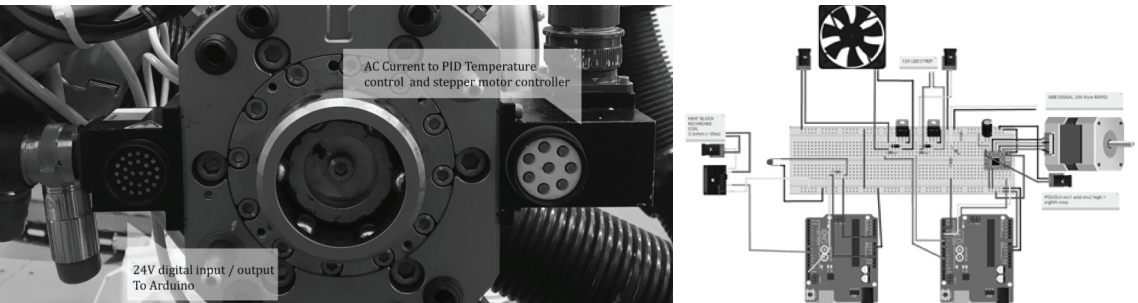
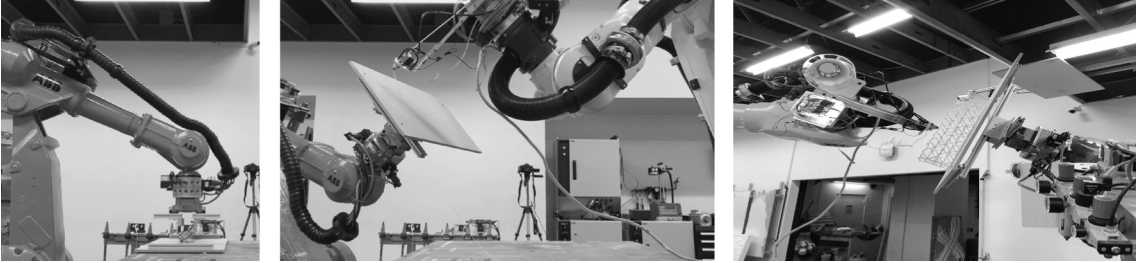


Figura 6. Digital I/O en brazo robótico para el accionamiento del EOAT. Elaboración propia

La señal emitida por el robot es interpretada por el arduino mediante la diferenciación de longitudes para activar equipamientos de extrusión con señales débiles del tipo Pulse Wave Modulated Signal (PWM).

La colaboración robótica es posible a través de la implementación de un sistema de coordenadas general, de modo que los mecanismos robóticos comparten el mismo espacio virtual (Ladrón de Guevara *et al.*, 2019).



.....  
 Figura 7. Colaboración de dos robots con herramientas de extrusión y agarre (2018).  
 Elaboración propia.

### Mecanismos CNC

Los enrutadores CNC industriales o impresoras 3D de consumo funcionan fundamentalmente de la misma manera pero con tres grados de libertad para el posicionamiento de la herramienta. Nuevamente, las instrucciones codificadas entregan instrucciones a través de E/S digital de bajo voltaje a sistemas generales y específicos, un grupo de motores para la posición y una herramienta especializada para la manipulación de materiales.

### Mecanismos singulares o personalizados

Debido a la limitación en escala de sistemas de manufactura heredados de otras industrias, actualmente se están integrando sistemas especializados en el proceso de construcción. La asociación de Noumena, el Instituto de Arquitectura

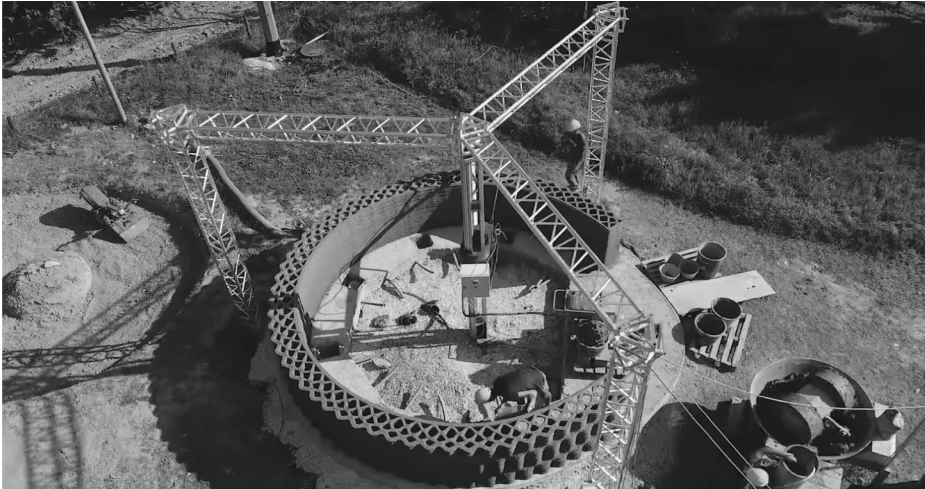


Figura 8. Proyecto de construcción de vivienda y comunidades sustentables mediante impresión 3D de materiales arcillosos Shamballa de WASP (2018). Reproducido con permiso de WASP..

Avanzada de Cataluña (IAAC) y TecNALIA, entre otras implementaciones exitosas, han construido un muro impreso en 3D con cable robótico (Izard *et al.*, 2017), apoyado por análisis de características superficiales mediante drones (<https://noumena.io/hello-world/>).

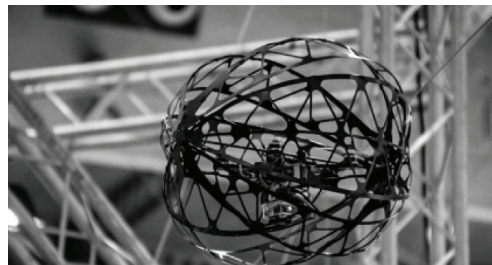


Figura 9. Noumena NERO Networking Environmental Robotics and IAAC cable robotics 3D printed wall (2018). Reproducido con permiso de Aldo Solazzo y Edouard Cabay, IAAC..

## Diseño digital a fabricación digital

La fabricación mediante CNCs, impresoras 3D y brazos robóticos tiene un punto en común: un código con coordenadas en el espacio y las instrucciones correspondientes. La complejidad aumenta de CNC a brazo robótico, y son muchas las estrategias empleadas para el diseño de un objeto y su posterior fabricación.

La fabricación mediante una de estas tres herramientas no conlleva necesariamente un diseño digital. Conlleva un diseño digitalizado. El diseño digital implica la manipulación de datos, y normalmente el proceso se extiende fuera del software de modelado. Por ejemplo, la fabricación mediante brazos robóticos requiere del diseño de una herramienta, (EOAT, por sus siglas en inglés «end of the arm tool») específica para esa tarea, la que se conecta al brazo versátil. La EOAT puede tener un microchip que controla el mecanismo, y este microchip ha de estar en comunicación con el brazo robótico para sincronizar movimientos e instrucciones. La comunicación se establece mediante unos pulsos eléctricos.

El término fabricación digital ha sido usado ampliamente para sumarizar todo aquel proceso en el que interviene una máquina controlada por un ordenador. En realidad, un proceso de fabricación completamente digital se debería entender si lo digital –es decir, los datos a su más bajo nivel– pasa a ser un código máquina y luego los pulsos eléctricos son manipulados directamente.

### **Prácticas de construcción robótica:**

#### **procesos de formación de estructuras de madera con brazos robóticos**

Como parte del ASO Studio en Carnegie Mellon University, el diseño y la fabricación de una maqueta de una cercha estructural se desarrolló en primavera de 2017. El proyecto está dividido en dos partes: el diseño y desarrollo de un centro de natación en Schendley Park, Pittsburgh, y el diseño digital y fabricación robótica de una sección de una cercha de madera estructural. El diseño está hecho mediante herramientas de computación y los archivos de fabricación están sacados directamente del modelo digital.

El proceso está compuesto de una parte de diseño computacional, usando *Grasshopper* y *Kangaroo*, *loops* de optimización y *workflow* de fabricación ro-

bótica que consiste en el uso de HAL + RobotStudio softwares, y el desarrollo de las herramientas montadas en los brazos robóticos ABB 6640 y ABB 4400.

El diseño de este proyecto gira en torno a fabricación robótica combinada con una estrategia de diseño con un enfoque tectónico mediante *loops* de retroalimentación. La fabricación consiste en un proceso de doblado de madera mediante vapor. El diseño y la fabricación son procesos entrelazados, que se informan mutuamente. El objetivo es el desarrollo de una maqueta de una sección de una cercha de madera a escala 1:2. La estrategia de diseño imita la evolución de una célula, en la cual la cercha adquiere un crecimiento multilinear. Cada lado de la célula está compuesto de un aro de madera, hecho con cuatro piezas fabricadas mediante doblado por vapor. Cada cuarto de aro solapa con el siguiente para asegurar continuidad de curvatura y tangencial.

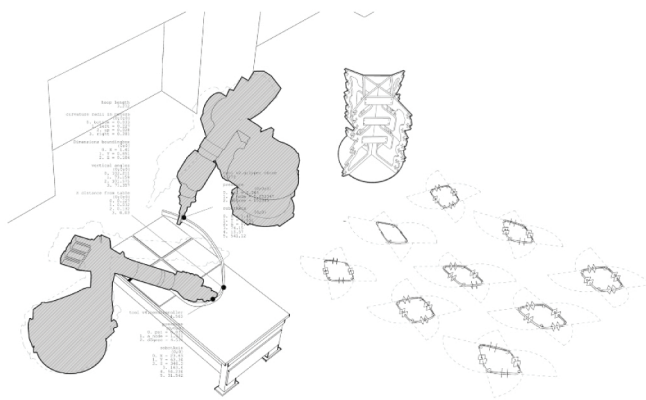


Figura 10. Estructura del proceso de fabricación. 6640 y 4400 ABB Robots coordinaron la personalización masiva de las partes de cerchas de muestra. Elaboración propia.

Para computar la célula, se usó *Grasshopper*, *Kangaroo* y *Python*. Una vez que el diseño de la pieza satisface las necesidades del proyecto, la información de la pieza se exporta a HAL, un *plugin* para *Grasshopper* que genera el código RAPID (el lenguaje del código que utiliza ABB). Un post-proceso de seguridad en *RobotStudio* es necesario para asegurar que la simulación del movimiento del robot corresponde con el resultado deseado.

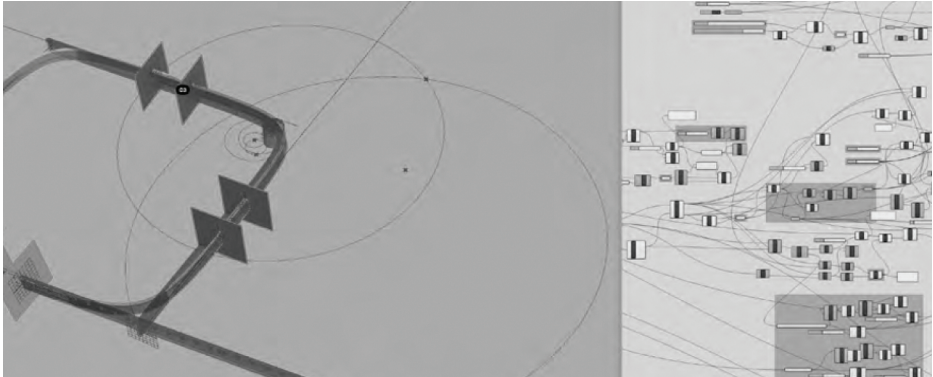


Figura 11. Form finding simulation to create tool path for robot. Elaboración propia.

## Prototipaje

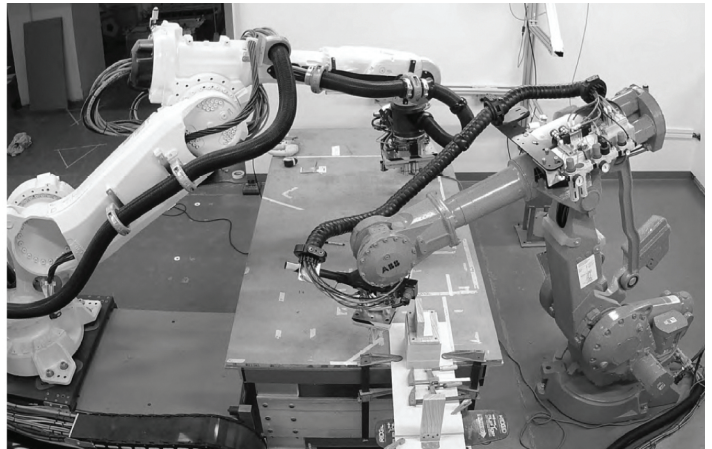
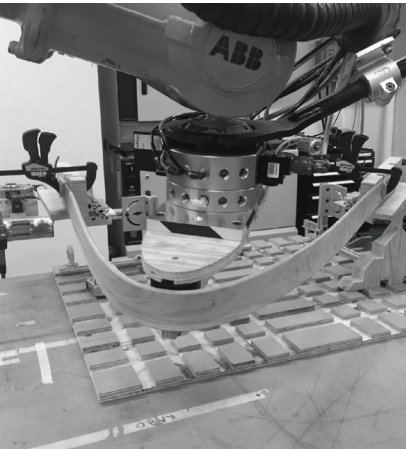
Al principio del proyecto, se testearon maquetas de madera a escala más reducida a modo de ensayo para probar el comportamiento del material. Por otro lado, a la misma escala de fabricación, testeamos el movimiento del robot con láminas de espuma. Usamos dos brazos robóticos coordinados para doblar la madera que previamente ha pasado por un proceso de vaporización.

## Fabricación robótica

Para fabricar el prototipo final testeamos un alto número de herramientas, que montadas en el brazo robótico, son necesarias para el proceso de fabricación. Son necesarias múltiples iteraciones para el correcto refinamiento de la herramienta. Un total de tres herramientas son necesarias para hacer en masa piezas a medida. Primeramente, una herramienta fijada a la mesa bloquea uno de los extremos de la pieza de madera. Una vez que se tiene la pieza de madera fijada en posición, el brazo robótico ABB 4400 posiciona una rueda cilíndrica en el punto de máxima curvatura que calcula el modelo digital. Esta rueda se queda

fija en su posición, y un segundo brazo robótico (ABB 6640) agarra, con una herramienta neumática, el otro extremo de la pieza de madera que no está fijo, y lo mueve lentamente hasta la posición deseada, usando la rueda cilíndrica como punto de apoyo para doblar la pieza. El lado de la rueda cilíndrica es perpendicular a la normal de la superficie de la madera doblada.

Después de la coordinación entre los dos brazos robóticos, la pieza de madera se queda fijada en posición para su correcto secado.



.....  
 Figura 12. Form finding simulation to create tool path for robot.

### Prácticas de construcción robótica: procesos de fabricación aditiva

La impresión 3D representa un nuevo paradigma de fabricación digital debido a su alta flexibilidad para producir geometrías complejas a bajo coste, altas prestaciones funcionales y mínima producción de residuos.

La posibilidad de optimizar la deposición de material en la fabricación aditiva es particularmente relevante por la reducción de gasto material, tiempo de fabricación y precisión, características que hacen de la técnica de fabricación aditiva robótica ideal para la producción de superficies estructurales de escala arquitectónica.



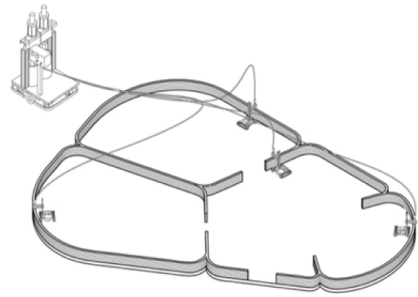
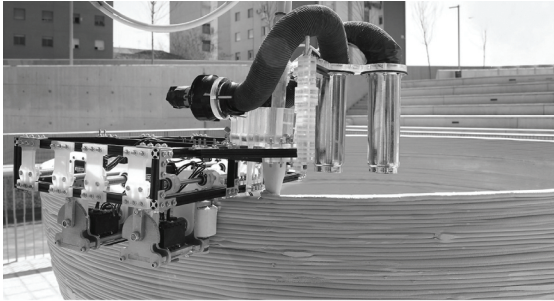


Figura 13. Minibuilders Project desarrollado en el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña. Reproducido con permiso de Dori Sadan.

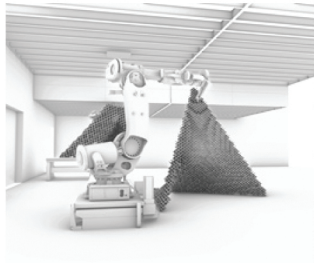


Figura 14. Impresora 3D de materiales termoplásticos con brazo robótico de 7 ejes para la construcción de membranas configuradas por teselaciones espaciales. Elaboración propia.

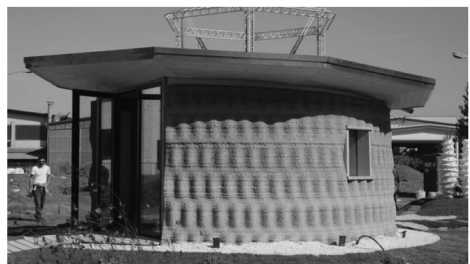
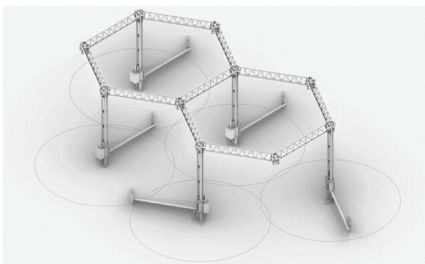


Figura 15. Impresora 3D de materiales arcillosos Infinity Crane de WASP. Reproducido con permiso de WASP Iberia, Gianluca Pugliese. Fotografía del autor.

Generalmente se da un marco de celosía que sujeta el mecanismo de extrusión, donde, al igual que en impresoras 3D comerciales, el mecanismo de extrusión se posiciona mediante el accionamiento de un conjunto de motores de tipo «*stepper*». Existen además avances en sistemas de posicionamiento más ligeros y escalables, como los constituidos por cables, o sistemas personalizados (<https://robots.iaac.net/>).

Es de especial interés la aplicación de la impresión 3D de gran escala a la fabricación de vivienda. La empresa italiana WASP recientemente ha publicado un sistema de impresión 3D de muros arcillosos, desarrollado para la producción en masa de vivienda de bajo coste y reducida huella ecológica.

En el proyecto Shamballa de WASP, el sistema de extrusión está alimentado por una bomba cuya potencia alcanza el valor máximo de 800 kW. Se asocia con un sensor de presión para controlar el flujo entrante. Se ha dado una forma planimétrica curva a la estructura realizada, lo que mejora la resistencia estructural. La sección transversal de la pared es, en cambio, alveolar, formada por una circunferencia interna, dos curvas sinusoidales y dos curvas cosinusoidales con ejes de las curvas circulares. La primera senoide y la primera cosenoide tienen la misma amplitud y frecuencia y comparten el mismo eje, cuyo radio es mayor que el de la circunferencia interna de una cantidad igual a la semiamplitud de las dos curvas. La segunda senoide y la segunda cosenoide tienen la misma frecuencia que las dos primeras curvas, pero una amplitud más baja; el eje que comparten las dos curvas tiene una forma circular con un radio igual al radio del primer eje aumentado por la semiamplitud del eje del segundo par de curvas. La tendencia sinusoidal de las curvas también está presente longitudinalmente, realizada al variar la amplitud de los sinusoides planimétricos a lo largo del eje vertical.

La complejidad que permite la deposición y el Control Numérico permite la caracterización de cada parte del muro, lo que mejora su rendimiento en aspectos tales como comportamiento estructural, térmico y ventilación. Tal geometría es imposible de fabricar mediante medios tradicionales. En el muro se crean tres series de cavidades, la más externa de las cuales se ha dejado hueca para permitir el paso del aire. En su lugar, los dos interiores se han llenado con cáscara de arroz, elemento de desecho en la producción del cereal, a fin de aumentar el rendimiento en relación con el intercambio de calor con el exterior.

El acto fundamental de la deposición es la colocación por control numérico del sistema de extrusor y la acción por un motor paso a paso Nema 17, conectado a un tanque (generalmente con una capacidad de 5 o 10 litros) dentro del cual el material se transporta hacia un tornillo capaz de alcanzar una presión de salida de 40 bar. Las altas presiones alcanzadas permiten la desgasificación del material arcilloso y el sistema de extrusión mixta (tornillo y presión) garantiza que el flujo sea manejable, interrumpiendo la deposición cuando sea necesario durante la impresión.

La mayoría de las impresoras 3D de gran escala tienen *firmware* tipo *Marlin*, lo que proporciona un lenguaje computacional común y pueden imprimir desde archivos *.gcode*, o también desde archivos *.stl*, procesando en este caso con software de corte como *SLic3r*, *Cura*, *Simplify 3D*.

El paradigma de fabricación capa a capa, por su parecido con la impresión 3D, es eficiente y fácil de implementar; otros mecanismos de impresión personalizados, sin embargo, requieren de un movimiento de sistema de extrusión más sofisticados. Estos sistemas requieren un posicionamiento en el espacio más complejo, por lo que, generalmente, requieren una escritura de *.gcode* personalizada.

### **Potencial de la automatización de la construcción para los objetivos del desarrollo sostenible**

Para analizar los impactos potenciales de la automatización de la construcción sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se consideraron tres mejoras significativas que se tendrían con la fabricación digital sobre las prácticas de construcción actuales: uso eficiente de materiales, seguridad y especialización en la construcción y manejo de ambientes complejos. Para cada una de estas mejoras se asoció el ODS con el que se identifica una mayor vinculación para analizar las oportunidades y retos que se tienen al incrementarse de manera considerable el uso tecnologías de construcción robótica.

## Uso eficiente de materiales- ODS 12

El ODS 12 busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles (ONU, 2015). A continuación se mencionan algunas metas de este objetivo, con oportunidades y retos por la mejora en la eficiencia del uso de materiales que se tiene con la construcción robótica.

La meta 12.5 se enfoca en reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. En esta meta se tiene la oportunidad de reducir considerablemente la generación de desechos debido a que el proceso de construcción robótica es más preciso que la construcción manual en los cálculos de cantidades de materiales que se van a requerir en un determinado proceso y los tiempos de construcción en cada proceso se determinan de manera más precisa por lo que se tienen menos pérdidas de materiales que son sensibles al paso del tiempo (como es el caso del concreto).

La meta 12.6 alienta a las empresas, en especial a las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes. Agustí-Juan y Habert (2017) realizaron una evaluación ambiental de la fabricación digital y encontraron que la sostenibilidad de los proyectos dependen principalmente de la producción de los materiales de construcción; específicamente, los impactos de la fabricación digital eran insignificantes comparados con los impactos de procesos de manufactura de los materiales de construcción. Esto pone en relieve la importancia de considerar aspectos ambientales en la manufactura de los materiales que se van a utilizar en los procesos de construcción automatizada y el ahorro de materiales en proyectos de fabricación digital en comparación con la construcción convencional para reducir los impactos ambientales en la industria de la construcción.

La metodología más aceptada para informes de sostenibilidad de procesos de construcción y en la manufactura de materiales de construcción es la de Análisis de Ciclo de Vida (Ding, 2014, citado por Agustí y Habert, 2017), por lo que se recomienda se utilice esta metodología al evaluar los impactos ambientales de sistemas de construcción tradicionales y automatizados.

## Seguridad y especialización en la construcción-ODS 8

El ODS 8 promueve el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos (ONU, 2015). A continuación se mencionan algunas metas de este objetivo, con oportunidades y retos que se presentan por la mejora en la seguridad y especialización en la construcción que se logran mediante la fabricación digital en la industria de la construcción.

La meta 8.2 busca lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra. La industria de la construcción es uno de los sectores con mayor valor añadido y con un uso intensivo de mano de obra y de los sectores que han tenido disminución o falta de crecimiento en su productividad en décadas recientes, donde otras industrias han aprovechado la automatización para mejorar su productividad, como la manufactura automotriz por ejemplo (Bock, 2015). García de Soto *et al.* (2018) encontraron que la productividad es mayor cuando se usan métodos de construcción robótica en estructuras complejas, lo cual permite una mayor especialización en la construcción al reducir la necesidad de mayor mano de obra para la realización de formas o estructuras complejas por cuestiones de funcionalidad o de estética.

La meta 8.3 promueve políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y fomentar la formalización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, incluso mediante el acceso a servicios financieros. Con el crecimiento exponencial que se está dando en avances de investigación y pruebas de campo de automatización de la construcción se espera que haya una disminución considerable en la demanda de mano de obra en la industria de la construcción.

En los países en desarrollo, donde la construcción es uno de los sectores de uso intensivo de mano de obra (McKinsey Global Institute, 2012), se deben implementar políticas de capacitación de personal para que puedan participar activamente en proyectos de construcción robótica que es donde se tendrá una mayor creación de puestos de trabajo. En los países desarrollados la industria

de la construcción está siendo poco atractiva para jóvenes, lo que representa un reto para cubrir la demanda de mano de obra (Sisson, 2018), y en algunos países europeos y en Japón el envejecimiento de la población está provocando un déficit de trabajadores en la construcción que requiere de fuerza corporal significativa de sus trabajadores, por lo que la construcción robótica se convierte en una necesidad. Los retos y oportunidades de la construcción automatizada dependen del contexto económico, laboral y demográfico de cada país o región.

### Manejo de ambientes complejos-ODS 11

El ODS 11 está enfocado en lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. A continuación se mencionan algunas metas de este objetivo y cómo el manejo de ambientes complejos de la construcción robótica puede aplicarse para mejorar el acceso a viviendas y servicios básicos, así como a tener una urbanización más inclusiva y sostenible.

La meta 11.1 busca asegurar el acceso a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles, y mejorar los barrios marginales; la meta 11.3 busca aumentar la urbanización inclusiva y sostenible. Estas dos metas están relacionadas al acceso a vivienda y urbanización sostenible con acceso a servicios básicos. En el 2014 el 30 por ciento de la población urbana en regiones en desarrollo vivían en condiciones categorizadas como barrios marginales o asentamientos precarios, representando 880 millones de personas alrededor del mundo (United Nations, 2016). Los ambientes urbanos son complejos, por lo que no existe una solución estandarizada para la construcción de vivienda que ayude incrementar el porcentaje de población que tenga acceso a vivienda digna con servicios básicos adecuados, seguros y asequibles, además de los aspectos culturales que deben tomarse en cuenta en cuanto a materiales y formas de viviendas en diferentes países y regiones dentro de cada país.

Las aplicaciones complejas a gran escala, como la construcción, han resultado ser un reto para la fabricación digital (Kohler, 2014), pero la investigación y aplicación de la robótica de construcción a gran escala está aumentando exponencialmente (Chen *et al.*, 2018) con lo cual se tendrá un avance significativo para reducir el déficit de vivienda en barrios marginales. Actualmente hay un

boom de empresas tecnológicas enfocadas en la impresión de casas en 3D que van desde la impresión de refugios para emergencias en menos de 30 minutos con polímeros especiales (<https://www.ls2n.fr/>), impresión de una casa completa de 55 a 74 metros cuadrados en 24 horas con material formulado en base de concreto (<https://www.iconbuild.com/>), impresión de casa de arcilla en menos de diez días utilizando materiales de construcción locales del sitio de construcción (<https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>), hasta una residencia o villa completa de varios pisos en 45 días (<http://www.winsun3d.com/>), lo cual muestra que el futuro de la construcción automatizada está pasando ya de la investigación y desarrollo a la implementación, que se espera sea masificada en los próximos años (Carpenter, 2019).

La meta 11.5 busca reducir la cantidad de muertes, personas afectadas y pérdidas económicas por desastres, y la meta 11.6 se enfoca en reducir el impacto ambiental de las ciudades. La construcción robótica utiliza materiales especialmente formulados para cada aplicación que se va a realizar, cuidando los aspectos estructurales y de resistencia ante posibles impactos ambientales, además de la modelación que se realiza simulando diferentes situaciones antes de iniciar la construcción, por lo que las viviendas y edificaciones que resultan de la construcción robótica son más resilientes que las realizadas por autoconstrucción u otros medios que resulten económicos para la población de bajos ingresos, que son quienes resultan más afectados ante fenómenos naturales de alto impacto (huracanes, inundaciones, terremotos, etc.). En la construcción automatizada se tiene un uso más eficiente de materiales y se generan menos desperdicios, por lo que se reduce de manera significativa el impacto ambiental de la industria de la construcción en las ciudades.

## Conclusiones y oportunidades

La Construcción 4.0 y la digitalización de los trabajos de edificación plantean un cambio de paradigma. El cambio presenta nuevos retos y oportunidades para abordar con nuevas herramientas computacionales algunos de los problemas relacionados con la crisis ecológica en la que nos encontramos inmersos. Para abordar los objetivos de desarrollo sustentable es fundamental aprovechar el

potencial aumento de productividad en el que incide la digitalización de la construcción a través de la implementación de nuevas metodologías de diseño computacional y nuevas técnicas de fabricación digital. La automatización de la construcción es un campo emergente que engloba distintas disciplinas, y exige discutir la labor tradicional de profesionistas en arquitectura y en ingeniería civil para incluir en el rango de sus capacidades herramientas computacionales que aborden la naturaleza del diseño digital, la caracterización virtual de la forma y la indexación la de información.

La fabricación digital y la automatización de la construcción incide positivamente en el proceso edificatorio, particularmente en cuanto al uso eficiente de material, la seguridad y especialización de las labores de construcción y la capacidad de manipular y ejecutar geometrías complejas. Se identifican tres ODS en los que incide significativamente la construcción automatizada mediante el uso de robots:

- Uso eficiente de materiales - ODS 12: metas 12.5 y 12.6
- Seguridad y especialización en la construcción - ODS 8: metas 8.2 y 8.3
- Manejo de ambientes complejos - ODS 11: metas 11.1, 11.3, 11.5 y 11.6

La construcción robótica y la digitalización de la industria de la construcción contienen un inmenso potencial de mejora de la productividad y reducción de huella ecológica, necesarios para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sustentable. Para alcanzar las mejoras que la Construcción 4.0 plantea es necesaria la incorporación de nuevas herramientas computacionales en cada fase del proceso, desde el diseño hasta la fabricación.

## Referencias

- Bock, T. (2015). The future of construction automation: technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in construction*, 59, pp. 113-121.
- (2008). Construction automation and robotics. *Robotics and automation in construction*. InTech, pp. 21-42.



- Borunda, L., Ladrón de Guevara, M., Anaya, J. y Pugliese, G. (2019, marzo). Additive manufacturing building components. 4th International Conference on Technological Innovation in Building. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Ingeniería Civil.
- , Ladrón de Guevara, M. y Anaya J. (2018, noviembre). Human-machine collaboration practices case studies. Architecture Engineering and Construction International Conference. Instituto Eduardo Torroja, Madrid.
- Cardoso, D. (2015). *Builders of the vision: Software and the imagination of design*. Routledge.
- Carpenter, S. (2019). 3D Printing in construction-how long does it take to print a house? *All3DP 3D printing magazine*. Consulta del 11 de mayo de 2019 en <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-construction-how-long-does-it-take-to-print-a-house/>
- Carpó, M. (2017). *The second digital turn: design beyond intelligence*. MIT Press.
- Chen, Q., García de Soto, B. y Adey, B. (2018). Construction automation: research areas, industry concerns and suggestions for advancement. *Automation in construction*, 94, pp. 22-38.
- De Soto, B., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G. y Adey, B. (2018). Productivity of digital fabrication in construction: cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in construction*, 92, pp. 297-311.
- Dillenburger, B. y Hansmeyer, M. (2013). The resolution of architecture in the digital age. *CAAD futures 2013. Communications in Computer and Information Science 2013*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 347-357.
- Gaja, F. (2003). *Revolució informacional, crisi ecològica i urbanisme*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gershenfeld, N. (2012). How to make almost anything: the digital fabrication revolution. *Foreign Affairs*, 91(6), pp. 43-57.
- (2008). *Fab: the coming revolution on your desktop-from personal computers to personal fabrication*. Basic Books.
- Gramazio, F., Kohler, M. y Willmann, J. (2014). Authoring robotic processes. *Architectural Design*, 84(3), pp. 14-21.
- Haas, C., Skibniewski, M. y Budny, E. (1995). Robotics in civil engineering. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 10(5), pp. 371-381.

- Hack, N., Lauer, W., Gramazio, F. y Kohler, M. (2014). Mesh mould: differentiation for enhanced performance. *Actas de la 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CUMINCAD*, pp. 139-148.
- Izard, J., Dubor, A., Hervé, P., Cabay, E., Culla, D., Rodríguez, M. y Barrado, M. (2017). Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots. *Construction robotics*, 1(1), pp. 69-76.
- Kelly, K. (2016). *The inevitable: understanding the 12 technological forces that will shape our future*.
- Kohler, M. (2014). Made by robots: challenging architecture at a large scale. *Architectural design*, 84(3), pp. 44-53.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age*. New York: Spon Press.
- Ladrón de Guevara, M., Borunda, L., Ficca J., Byrne, D., y Krishnamurti, R. (2019). Robotic free-oriented additive manufacturing technique for thermoplastic lattice and cellular structures. *Intelligent & Informed*, actas de la 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, vol. 2, 333-342.
- , Borunda, L. y Krishnamurti, R. (2019). A multi-resolution design methodology based on discrete models. *Computer-Aided Design. «Hello, Culture»*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. J.-H. Lee (ed.): CAAD Futures 2019, CCIS 1028, pp. 1-14.
- Lynn, G. (1993). Architectural curvilinearity: the folded, the pliant and the supple. *Folding in architecture. AD*, pp. 8-15.
- y Kelly, T. (1999). *Animate form*. Nueva York: Princeton Architectural Press.
- Maeda, J. (1994). *Development and application of the SMART System. Automation and Robotics in Construction XI*. Amsterdam: Elsevier, pp. 457-464.
- Malé, M. (2016). *El potencial de la fabricación aditiva en la arquitectura : hacia un nuevo paradigma para el diseño y la construcción*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Menges, A. y Ahlquist, S. (2011). *Computational design thinking: computation design thinking*. John Wiley & Sons.
- Negroponte, N. (1995). *Being digital*. Nueva York: Random House Vintage Books.
- (1975). The architecture machine. *Computer-Aided Design*, 7 (3), pp. 190-195.

- ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.
- Ottoson, O. (1938). *Teapot*. United States: 2,135,410.
- Oxman, N. y Rosenberg, J. (2007). Material-based design computation. An inquiry into digital simulation of physical material properties as design generators. *International journal of architectural computing*, pp. 26-44.
- y Oxman, R. (2014). *Theories of the digital in architecture*. Nueva York: Routledge.
- (1999). Educating the designerly thinker. *Des. Stud* 20, 105-122.
- Rossi, A. y Eisenman, P. (1982). *The architecture of the city*. Cambridge: MIT Press.
- Rifkin, J. (2014). *The zero marginal cost society: the internet of things, the collaborative commons, and the eclipse of capitalism*. St. Martin's Press.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: a new global style for architecture and urban design. *Archit. Des.*, 79, pp. 14-23.
- Sisson, P. (2018). Construction industry, mid boom, can't find enough skilled workers. En <https://www.curbed.com/2018/1/23/16910310/construction-homebuilding-labor-shortage-jobs-vocational-training>
- United Nations. (2016). *The sustainable development goals report 2016*. United Nations.
- Warszawski, A. (1984). Application of robotics to building construction. Actas de la 1st. International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
- Willmann, J., Gramazio, F., Kohler, M. y Langenberg, S. (2013). Digital by material. *Rob / Arch 2012 2013*, Viena: Springer, pp. 12-27.

### Contactos de los autores

- LUIS BORUNDA MONSIVÁIS  
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España  
lborunda.eco@etsav.cat

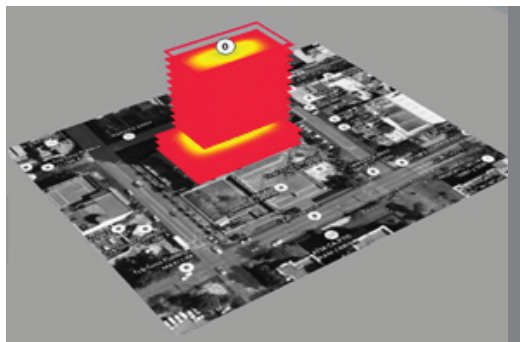
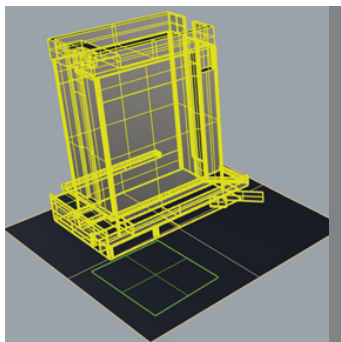
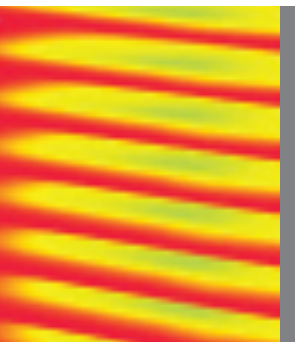
- MANUEL LADRÓN DE GUEVARA  
Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Estados Unidos  
manuelr@andrew.cmu.edu
- GILBERTO VELÁZQUEZ ANGULO  
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
gvelazq@uacj.mx
- JESÚS ANAYA DÍAZ  
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España  
jesus.anaya@upm.es



*Hábitat, vivienda y Construcción 4.0*  
se terminó de imprimir y encuadernar  
en diciembre de 2020  
en los talleres gráficos de  
TRICICLO,  
Penitenciaría 316, Centro,  
Guadalajara, Jalisco, México.

[triclocinco@yaho.com.mx](mailto:triclocinco@yaho.com.mx)

El tiraje fue de 500 ejemplares.



La presente obra constituye un primer esfuerzo coordinado desde el Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Guadalajara para abordar el complejo desarrollo del concepto Industria 4.0 y su aplicación subsidiaria en el sector de la construcción mediante la denominada Construcción 4.0, teniendo como principal objetivo el

de permitir que el lector especializado en las disciplinas relacionadas con la arquitectura, el diseño y el urbanismo tenga una herramienta tanto teórico-conceptual como de resultados de investigación aplicada que perfilen cómo se desarrolla poco a poco la interpretación y la adaptación de la Construcción 4.0 de manera general en la producción del hábitat y, particularmente, de la vivienda.

