



CEU

*Universidad
San Pablo*

Escuela Politécnica Superior

La fabricación digital y su aplicación en el ámbito de la educación superior universitaria. El laboratorio de fabricación digital FabLab Madrid CEU

Covadonga Lorenzo Cueva
Directora FabLab Madrid CEU
Universidad CEU San Pablo
Festividad de San José
Marzo 2017



CEU | *Ediciones*

La fabricación digital y su aplicación en el
ámbito de la educación superior universitaria.
El laboratorio de fabricación digital
FabLab Madrid CEU

Covadonga Lorenzo Cueva
Directora FabLab Madrid CEU
Universidad CEU San Pablo
Festividad de San José
Marzo 2017

Escuela Politécnica Superior
Universidad CEU San Pablo

**La fabricación digital y su aplicación en el ámbito de la educación superior universitaria.
El laboratorio de fabricación digital FabLab Madrid CEU**

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita escanear algún fragmento de esta obra.

© 2017, Covadonga Lorenzo Cueva
© 2017, Fundación Universitaria San Pablo CEU

CEU *Ediciones*
Julián Romea 18, 28003 Madrid
Teléfono: 91 514 05 73, fax: 91 514 04 30
Correo electrónico: ceuediciones@ceu.es
www.ceuediciones.es

Maquetación: Luzmar Estrada Seidel (CEU *Ediciones*)

Depósito legal: M-14308-2017

La presente lección magistral trata de profundizar sobre las aplicaciones de la fabricación digital en el ámbito de la educación superior universitaria, a partir del trabajo que se lleva a cabo en el laboratorio de fabricación digital FabLab Madrid CEU, ubicado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo.

Fabricación Digital

La fabricación digital es el conjunto de tecnologías integradas mediante las cuales se hace posible la digitalización de los procesos de fabricación. Gracias a ella, en lugar de requerirse técnicos cualificados para el manejo de maquinaria compleja en el proceso de producción, son los ordenadores los que controlan las máquinas de prototipado. Con ello se consigue una mayor precisión en el acabado final del producto, pero además y lo que es más importante, se hace posible el acceso de más personas a los medios de producción, ya que tan sólo se requiere de un modelado tridimensional del objeto a fabricar generado en un software de diseño que posteriormente se fabrica empleando máquinas controladas por ordenador como fresadoras, cortadoras láser, cortadoras por cuchilla de precisión o impresoras 3D. Esta tendencia hacia la democratización de la producción y la automatización total de la manufactura a partir del uso de tecnologías de fabricación digital¹ implica que cualquier persona, puede tener acceso a la fabricación de objetos de cierta complejidad técnica². Además, estas tecnologías reducen los costes y los tiempos entre el diseño y la producción, permitiendo acelerar los mecanismos de fabricación de pequeñas cantidades de productos³. Por todo ello, la

¹ GERSHENFELD, N. (2005) *FAB. The Coming Revolution on your Desktop*, Basic Books, Nueva York.

² "A main driving force (...) has been the ability to manufacture in low volume without loss of precision or complexity. To do so, I argue you need access to custom digital fabrication tools. The automation of digital fabrication enables repeatability and accuracy; the customization of those tools enables widespread applicability". PEEK, N. (2015) *Making Machines that Make: Object-Oriented. Hardware Meets Object-Oriented Software*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

³ RIFKIN, J. (2015) *The Zero Marginal Cost Society: The Internet of Things, the Collaborative Commons, and the Eclipse of Capitalism*, Palgrave Mcmillan, Nueva York.

fabricación digital se ha convertido en la tecnología disruptiva por excelencia, responsable de una nueva revolución tecnológica⁴.

Por increíble que parezca, las tecnologías que se emplean en fabricación digital no son precisamente actuales. En cuanto a las tecnologías sustractivas –aquellas en las que se parte de un bloque de material, sobre el que se realizan operaciones de desbaste retirando capas hasta obtener la geometría definitiva de la pieza– la primera fresadora por control numérico se fabricó en el año 1954, diseñada por John T. Parsons a partir de un diseño previo desarrollado en un proyecto de colaboración entre el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y la empresa de armamento Lockheed⁵. A partir de entonces, la automatización de otras máquinas de mecanizado y corte⁶ discurriría en paralelo al desarrollo del diseño asistido por ordenador⁷, cuya aplicación en arquitectura comenzó en los años ochenta, con la creación de programas CAD para el dibujo más eficiente de planos arquitectónicos; continuó en la década de los noventa, con el desarrollo de programas de modelado tridimensional y renderizado y avanzó hacia el diseño paramétrico⁸ hasta llegar a las tecnologías de fabricación digital y los sistemas BIM (*Building Information Modelling*), consideradas las últimas generaciones en la aplicación de las tecnologías digitales en la disciplina arquitectónica.

Las tecnologías aditivas, por su parte, aparecen en la década de los ochenta debido a los avances sobre las impresoras de inyección de tinta que habían comenzado a fabricarse en la década anterior y que evolucionaron hacia la impresión con materiales.⁹ A diferencia de la fabricación sustractiva, la impresión 3D permitía la creación de piezas mediante deposición de material fundido que se añadía en capas sucesivas conformando el objeto y empleando para ello, tan sólo una décima

⁴ ANDERSON, C. (2012) *Makers, the New Industrial Revolution*, Crown Publishers Group, Nueva York.

⁵ GERSHENFELD, N. (2012) “How to Make Almost Anything. The Digital Fabrication Revolution”. *Foreign Affairs*, 91/ 6, Council in Foreign Relations, Nueva York.

⁶ En 1965 se utilizó la primera máquina de corte láser para perforar orificios en los troqueles de diamantes. La máquina fue diseñada por la compañía estadounidense de ingeniería eléctrica Western Electric Engineering Research Center.

⁷ En 1955 el Lincoln Laboratory del MIT desarrolla el primer sistema gráfico denominado SAGE (*Semi Automatic Ground Environment*) y en este mismo lugar, en 1962, Ivan Sutherland desarrolla el sistema *Sketchpad* basado en su propia tesis doctoral titulada *A Machine Graphic Communication System*.

⁸ PÉREZ DE LAMA, J.; OLMO, J. J.; SÁNCHEZ-LAULHÉ, J. M.; GUTIÉRREZ, M. (2012) “Incorporación del diseño y fabricación digital a la arquitectura: docencia y práctica profesional”. *4I AU IV Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/15010>.

⁹ En 1983 Charles W. Hull, co-fundador de la empresa 3D Systems inventa la estereolitografía, un proceso de impresión que permite la creación de un objeto a partir de datos digitales.

parte del material, aunque con tiempos de fabricación más elevados. Sin embargo, la verdadera revolución de la impresión 3D no llegaría hasta que una comunidad de aficionados a la informática conocidos como “*hackers*” accedieron a ella, trasladando su ideología centrada en la creación de software libre que distribuían de manera gratuita, al prototipado de objetos.

En el año 2005, Adrian Bowyer funda en la Universidad de Bath el proyecto RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*), una iniciativa de código abierto para construir impresoras 3D que se pudieran autoreplicar. A partir de entonces, el hardware basado en la filosofía de código abierto se convirtió en el estandarte de una comunidad de inventores y aficionados, conocidos como “*makers*” que trabajaban de modo colaborativo intercambiando ideas innovadoras y diseños. En 2009, tras expirar las patentes de los equipos de impresión 3D creados en la década de los ochenta aparece MakerBot Industries, fundada por Adam Mayer, Bre Pettis y Zach Smith, una de las primeras empresas surgidas del movimiento “*maker*” que comenzó la venta de kits de piezas que permitían a los usuarios fabricar sus propias impresoras, con la opción de hacer modificaciones y mejoras en las máquinas para adaptarlas a sus necesidades.

En julio de ese mismo año se celebró en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo (EPS, CEU-USP) el taller de verano “Construye tu propia impresora 3D Makerbot”¹⁰ al que asistió como invitado Zach Smith, donde un grupo de alumnos fabricaron varias impresoras del primer modelo de Makerbot conocido como *CupCake*¹¹. Con las primeras impresiones los alumnos encontraron ciertas limitaciones en el tamaño de la impresora para su aplicación a la fabricación de maquetas arquitectónicas. Se decide entonces implementar el modelo original de Makerbot aumentando sus dimensiones. Para ampliarla se modificó la estructura, diseñando nuevas piezas que pudieran obtenerse con una máquina de corte láser de 60x45 centímetros y empleando conglomerado de madera de alta densidad, mucho más económico e incluso más resistente que el contrachapado usado para la impresora original. El extrusor se cambió por una nueva versión, se

¹⁰ El curso de verano “Construye tu propia impresora 3D Makerbot” fue coordinado por el *alumni* de la EPS (CEU-USP) Guillermo Gago Doreste y en el taller participaron los alumnos Andrés Velasco Muro, Antonio Fernández, María Carreras, Marta Sequeiros, Carlos Campillo y Alba García.

¹¹ A la primera impresora fabricada por Makerbot Industries en 2009 denominada *CupCake* le siguieron otras más versátiles y fáciles de manejar, como Thing-O Matic (en 2010) y Replicator (en 2012). Además, Zach Smith y Bre Pettis crearon un sitio web llamado Thingiverse con archivos de código abierto de diseños digitales creados por usuarios que permitían su uso bajo licencias Creative Commons y que funcionaba como una especie de biblioteca pública en la que era posible compartir diseños y colaborar en proyectos de impresión 3D.

mejoró la fijación de las barras del eje y así como la colocación de la correa del eje z y se situó la fuente de alimentación en el panel trasero. Esta nueva impresora que contaba también con piezas impresas en la original se denominó Makerbot Ark-e¹², y pasó a formar parte de la primera familia de impresoras replicantes que surgieron en España durante aquellos primeros años de expansión de la impresión 3D.

Si el movimiento “maker” impulsó la democratización de la tecnología de impresión 3D a través de espacios denominados Makespaces¹³, la introducción de los Laboratorios de Fabricación Digital, conocidos como FabLabs (acrónimo del inglés *Fabrication Laboratory* o *Fabulous Laboratory*) supusieron la democratización de las tecnologías de fabricación digital, que engloban el empleo de tecnologías sustractivas, de corte y aditivas combinadas con componentes electrónicos para fabricar prototipos interactivos; tecnologías de fabricación de moldes y materiales compuestos y el empleo de un sistema de videoconferencia que permite a los laboratorios estar conectados entre sí. La idea de FabLab nació en el año 2000 de la mano de Neil Gershenfeld, director del Center for Bits and Atoms (CBA) del MIT gracias a un proyecto de investigación realizado en colaboración con el *Grassroots Invention Group* en torno a la relación entre el mundo de la información digital (los bits) y el mundo físico tangible (los átomos). En 2001 Gershenfeld comenzó a impartir el curso “*How to Make (almost) Anything*”¹⁴ un programa académico diseñado para mostrar a los alumnos del politécnico las posibilidades de las nuevas tecnologías de fabricación digital. En el año 2003 recibió financiación de la *National Science Foundation* para montar el primer laboratorio de fabricación digital fuera del MIT, el SETC FabLab (South End Technology Center). Desde entonces, la comunidad de laboratorios ha crecido a una increíble velocidad, apoyada por Fab Foundation, una fundación creada en 2009 para el apoyo y el fomento de las relaciones de todos los laboratorios de fabricación digital con el MIT¹⁵.

Fabricación Digital en la docencia de Arquitectura

En el campo de la arquitectura, la incorporación de la fabricación digital en los procesos de proyectos arquitectónicos se inició en los años noventa con la aparición

¹² El diseño de la impresora Makerbot Ark-e pertenece al alumno Guillermo Gago Doreste quien trabajó en colaboración con un grupo de alumnos de la EPS (USP-CEU) en su fabricación y puesta en marcha.

¹³ Véase: ALVARELLOS, S.; GARCÍA, C. (2016) *Manual de supervivencia Maker*, Makespace Madrid.

¹⁴ GERSHENFELD, N. (2012) *How to Make Almost Anything. The Digital Fabrication Revolution*, op. cit.

¹⁵ Véase: GARCÍA, C. (2016) *Casi todo por hacer. Una mirada social y educativa sobre los Fab Labs y el movimiento maker*, Fundación Orange, Madrid.

de una serie de proyectos que hacían uso de la combinación CAD (Computer Aided Design) y CAM (Computer Aided Manufacture)¹⁶. En este contexto parecía oportuno reflexionar sobre la relevancia de esta integración de los nuevos procesos de diseño y producción en la disciplina arquitectónica¹⁷ y en el año 2012, inspirados por el programa académico de Gershenfeld, comenzamos a impartir en la escuela el Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura, aunque contábamos por entonces únicamente con dos cortadoras láser ubicadas en el aula de maquetas, con las que se impartían los cursos del Taller Paramétrico CEU¹⁸. El principal objetivo de este programa se centró en complementar los conocimientos adquiridos por los alumnos de arquitectura en las asignaturas del grado en arquitectura, aportando el alto potencial que ofrecían los programas de diseño asistido por ordenador y las tecnologías de última generación asociadas a un Laboratorio de Fabricación Digital. Se diseñaron asignaturas de diseño asistido por ordenador que complementaban las que ya se ofrecían en las asignaturas de primer curso del Grado en Arquitectura y se incorporaron, además, módulos de diseño paramétrico, simulación virtual y animación; programas de creación y edición de imágenes rasterizadas y gráficos vectoriales; herramientas de publicación digital; programas de dimensionado de estructuras; sistemas de información geográfica; fotogrametría, escaneado tridimensional y por último, *Building Information Modelling*, una tecnología imprescindible hoy en día para cualquier profesional de la arquitectura.

En relación con la manufactura digital se pensó en asignaturas de carácter práctico, centradas en la realización de proyectos que explorasen el potencial de las tecnologías sustractivas, de corte y aditivas en el campo de la arquitectura. Así, entre los proyectos realizados con tecnología de fresado por control numérico cabe mencionar los pabellones experimentales efímeros de madera en los que se exploran propuestas estructurales de distinto carácter, así como las piezas de mobiliario que trasladan estas investigaciones a la pequeña escala. Por su parte, con corte láser hemos realizado proyectos de cerchas generadas a partir de

¹⁶ PÉREZ DE LAMA, J.; OLMO, J. J.; SÁNCHEZ-LAULHÉ, J. M.; GUTIÉRREZ, M. (2012) "Incorporación del diseño y fabricación digital a la arquitectura: docencia y práctica profesional", *op. cit.*

¹⁷ Véase: AGKATHIDS, A. (2010) *Digital Manufacturing in Design and Architecture*, BIS Publishers, Amsterdam; DUNN, N. (2012) *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence King Publishing, Londres; IWAMOTO, L. (2009) *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, Princeton Architectural Press, Nueva York y KOLAREVIC, B. (2003), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Nueva York.

¹⁸ En el año 2010 se crea el Taller Paramétrico CEU de la Escuela Politécnica Superior fundado por los entonces alumnos Pablo Delgado Ramírez y Andrés Velasco Muro, que en el año 2012 se incorporarían como profesores al módulo de diseño paramétrico del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura de FabLab Madrid CEU, donde continuaron desarrollando sus investigaciones y proyectos.

desarrollos poliédricos, prototipos estructurales sismo-resistentes y moldes para encofrados empleando procesos que después hemos trasladado al diseño de producto y mediante corte por cuchilla de precisión hemos hecho proyectos de gráfica digital para rotulación de espacios expositivos e instalaciones efímeras. Finalmente, empleando impresión 3D nos hemos centrado en maquetas arquitectónicas enfocadas al análisis de elementos constructivos en estructuras articuladas y desplegadas, así como uniones de carpintería realizadas con técnicas de carpintería tradicional que pudieran recuperarse a partir de tecnologías digitales de última generación. Con el fin de ofrecer una visión general de la aplicación de estas tecnologías en el ámbito del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura, se muestra a continuación una selección de proyectos realizados en los distintos módulos con las tres tecnologías anteriormente mencionadas.

Tecnologías sustractivas

Entre los proyectos realizados con tecnología de fresado por control numérico cabe mencionar los pabellones experimentales efímeros que hemos realizado con estructuras de madera. Reflexionado sobre el potencial del campus como lugar de experimentación, se planteó un ejercicio que conectaba también con el interés por las estructuras ligeras desplegadas construidas con delgadas láminas de madera, que adquieren su forma gracias al pretensado producido por la flexión elástica de las mismas (Figura 1).



Figura 1: Pabellón Anticycloid realizado por los alumnos Ricardo Casas, Pablo Cosín, Jorge Cuartas, Raúl Fernández, Daniel Fernández, Luis González, Fernando Miñarro y Gabriel Muñoz. Profesores: Pep Tornabell, Enrique Soriano y Daniel Bas (CODA Office).

Así, se construyó un pabellón de planta elíptica, de unos doce metros de largo por cinco metros de ancho aproximadamente¹⁹. Se trata de una cáscara ligera a

¹⁹ El prototipo se diseñó y fabricó en el módulo de diseño paramétrico del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por tres investigadores del grupo de investigación CODA Office (Computational Design Affairs): Pep Tornabell, Enrique Soriano y Daniel Bas, con la participación de los alumnos Ricardo Casas, Pablo Cosín, Jorge Cuartas, Raúl Fernández, Daniel Fernández, Luis González, Fernando Miñarro y Gabriel Muñoz.

modo de pérgola de lamas de madera entrelazadas que aprovecha las propiedades de flexión del material para aportar rigidez y conseguir una forma de doble curvatura basada en la curva *anticycloid* de Hans Dirnböck²⁰. Para construirlo se emplearon 150 uniones atornilladas, veinte cinchas de cuatro metros de largo para tensionar la estructura y doce tableros de contrachapado de madera de doce milímetros de espesor que se alistonaron en tiras de 1.10 metros de largo²¹.

Profundizando algo más en este tipo de estructuras desarrollamos otra (Figura 2) en la que también obteníamos la geometría resultante como expresión del comportamiento estructural del material²². Sin embargo, si en el caso anterior se hizo empleando láminas trenzadas de tableros de madera contrachapada aquí se emplearon tableros de mayor dimensión que fresábamos previamente ajustando su forma al comportamiento de la estructura y aligerándolos antes de la operación de curvado.



Figura 2: Pabellón realizado por los alumnos Carolina Andrés, Feng-Che Cheng, Diego Crisóstomo, Juan Esteve, Álvaro Fernández, J. A. Miguel Velasco, Ana Montero, Claudia Morollón, Iván Ordóñez, David Pérez, Carmen Ramos y Julia Ruiz. Profesores: Pablo Delgado (diseño), Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo (fabricación digital).

En la fabricación utilizaríamos catorce tableros de madera de contrachapado de 1.20 por 2.40 metros mecanizados para obtener las piezas, que adquirirían su

²⁰ Véase: DIRNBÖCK, H. (1987) *Die Antizykloidenbewegung*, Verlag Heyn, Klagenfurt, Austria.

²¹ El proyecto aparece publicado en: PÉREZ DE LAMA, J. (2014) *Yes, we are open. Fabricación Digital, tecnologías y cultura libres*, Universidad de Sevilla.

²² El pabellón se diseñó y fabricó en el módulo de diseño paramétrico del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Pablo Delgado (responsable del diseño) en colaboración con Covadonga Lorenzo y Epifanio Lorenzo (responsables de la fabricación digital) y contando con la participación de los alumnos Carolina Andrés, Feng-Che Cheng, Diego Crisóstomo, Juan Esteve, Álvaro Fernández, J. A. Miguel Velasco, Ana Montero, Claudia Morollón, Iván Ordóñez, David Pérez, Carmen Ramos y Julia Ruiz.

forma definitiva gracias a la colocación de veinticuatro catenarias fijadas a las piezas de madera con tornillería de acero²³.

También hemos tratado de explorar otras propuestas estructurales (Figura 3), en la que la geometría final surgía como resultado de incorporar en el modelo digital las leyes físicas fundamentales como la gravedad y su efecto sobre materiales sin rigidez a flexión y en los que la forma resistente se obtenía por inversión del funicular de las cargas.²⁴ En su definición se emplearía un software de diseño paramétrico con el que se generó una superficie triangulada en la que se fijó la posición de las articulaciones y sobre la que se definieron una serie de puntos de apoyo. A continuación, la superficie se transformó en una malla tridimensional en la que se aplicaba un empuje contrario a la fuerza de gravedad que levantaba en el espacio la estructura anti-funicular.

Finalmente, la superficie resultante se transformó en un conjunto de nudos y barras cuya dimensión podía ser modificada según las tolerancias que requiriese el material a emplear. Para los nudos articulados y las ochenta y dos barras de la estructura se emplearon tableros de aglomerado reciclados de unas viejas estanterías, que se mecanizaron por control numérico y se ensamblaron empleando varillas roscadas de acero en las articulaciones, explorando con todo ello procesos aditivos de fabricación que emplean pequeñas piezas articuladas.

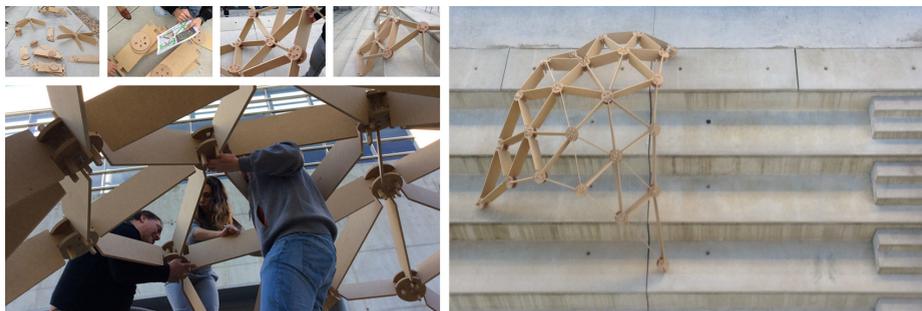


Figura 3: Pabellón realizado por los alumnos María Antón Barco, Diego Crisóstomo, Anastasia Leonovitch, Chloe Munkenbeck y David Pérez. Profesores: Pablo Delgado (diseño), Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo (fabricación digital).

²³ Véase: OBUCHI, Y. (2013) “99 Failures for One Pavilion”, *Domus* (Digital Edition). Disponible en: http://www.domusweb.it/en/architecture/2014/01/07/99_failures_and_onepavilion.html

²⁴ La pérgola fue diseñada y fabricada en el módulo de diseño paramétrico del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Pablo Delgado (responsable del diseño) en colaboración con Covadonga Lorenzo y Epifanio Lorenzo (responsables de la fabricación digital) y contando con la participación de los alumnos María Antón Barco, Diego Crisóstomo, Anastasia Leonovitch, Chloe Munkenbeck y David Pérez.

En agosto de 2015, durante un curso de verano en la *School of Architecture and Planning* del Massachusetts Institute of Technology, pudimos acceder a su maquinaria de control numérico: fresadoras de tres ejes y brazos robóticos (Figura 4)²⁵.

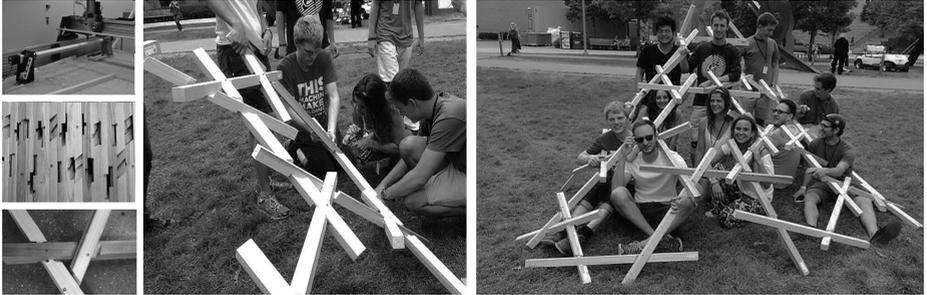


Figura 4: Pabellón realizado por los alumnos Mateo Alfaro, Lola de Castro, Borja Fernández, Elena Mínguez, Fernando Navarrete y Lucía Simón durante el taller *Automation of Reciprocation Frame Fabrication*. Profesores: David Moses y Trygve Wastvedt.

Con estas herramientas pudimos explorar otras propuestas estructurales que permitían la generación de diseños basados en patrones geométricos combinados, que se materializaban a partir de listones de madera de sección cuadrada empujados entre sí, mecanizadas para conseguir entalladuras a media madera en forma de T que no debilitasen sensiblemente su resistencia a la flexión. Así, con el diseño y fabricación de un pequeño prototipo exploramos nuevos sistemas para cubrir grandes luces con piezas de pequeñas dimensiones que generan estructuras estables y versátiles auto-sustentantes sin necesidad de piezas de anclaje adicionales.

El último prototipo a mostrar (Figura 5) se pensó como una pieza de mobiliario urbano aglutinador de servicios replicable, interactivo y optimizado para adaptarse a una ubicación dada gracias al empleo del diseño paramétrico²⁶. La idea

²⁵ En el mes de agosto de 2015, en el marco del curso de verano organizado por FabLab Madrid CEU los alumnos del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura participaron en el taller *Automation of Reciprocation Frame Fabrication* celebrado en la *School of Architecture and Planning* del MIT impartido por los arquitectos David Moses y Trygve Wastvedt, colaborando en el diseño y fabricación de un prototipo estructural basado en el proyecto de investigación *Framework Pavilion* desarrollado por Barry Beagen, David Moses, Trygve Wastvedt y Robert White. Los alumnos participantes fueron Mateo Alfaro, Lola de Castro, Borja Fernández, Elena Mínguez, Fernando Navarrete y Lucía Simón.

²⁶ Durante el curso académico 2012-2013 José Ballesteros impartió el módulo de diseño paramétrico del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura, planteando a los alumnos trabajar sobre este elemento de mobiliario urbano que se construyó a final de curso durante el taller *Prototipolab* realizado en las instalaciones de la empresa CIS Madeira ubicada en La Coruña, contando con los alumnos Gabriel Muñoz, Juan Gros, Ricardo Casas, Fernando Miñarro, Pablo Tato, María del Castillo, Daniel Fernández, Antonio Moreno, Mar Bermejo y Adolfo Gutiérrez.

planteaba la posibilidad de colocar estos elementos urbanos en distintos puntos de la ciudad a modo de estaciones dotadas de cargadores para todo tipo de *gadgets*, acceso wifi gratuito e incluso un pequeño cargador de bicicletas eléctricas.



Figura 5: Pabellón realizado por los alumnos Gabriel Muñoz, Juan Gros, Ricardo Casas, Fernando Miñarro, Pablo Tato, María del Castillo, Daniel Fernández, Antonio Moreno, Mar Bermejo y Adolfo Gutiérrez durante el taller *Prototipolab*. Profesor: José Ballesteros.

La estructura se resolvía con la disposición de un núcleo central que zunchaba una serie de costillas de madera, sobre la que se apoyaba una cubierta, pensada para incorporar unos paneles fotovoltaicos y para proteger un banco ubicado sobre las costillas inferiores. La forma del prototipo podría variar según su ubicación ya que la cubierta se generaba en función de la máxima radiación solar que pudiera recibir en una determinada geolocalización. La construcción del prototipo se desarrolló enteramente en el Parque Tecnológico Tecnopole de La Coruña, en las instalaciones de la empresa CIS Madeira donde contamos con el apoyo de personal técnico que nos ofreció asistencia, acceso a sus fresadoras industriales y a suministros de tableros, herrajes, sistemas de aislamiento e impermeabilización así como a productos experimentales para el tratamiento de la madera.

También empleando sistemas de costillas de madera hemos realizado varios prototipos de mobiliario, aplicando a la pequeña escala estas investigaciones, como bancos o sillas que emplean un costilleado sencillo de madera (Figura 6). Estas piezas basan su morfología en superficies generadas por ordenador, las cuales se pueden modificar para adaptarlas a diferentes morfologías, replanteando su forma en función del usuario.

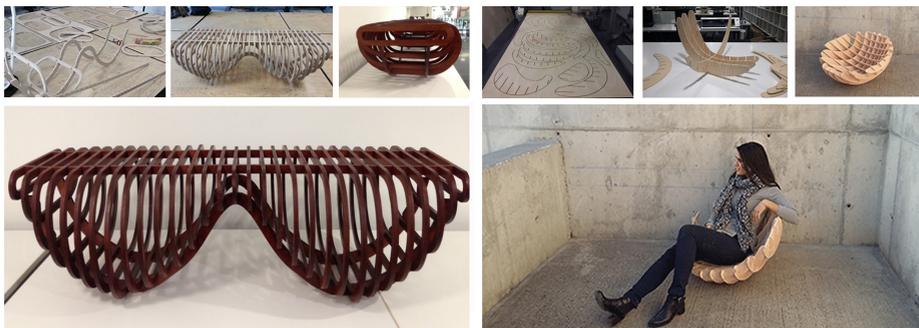


Figura 6: Mobiliario realizado por Adolfo Gutiérrez (izquierda) y María Santisteban (derecha). Profesores: Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

Otros diseños de mobiliario tratan de aprovechar al cien por cien el tablero de madera, además de facilitar su almacenaje y transporte (Figura 7) partiendo de un único diseño paramétrico que permite su fabricación con distintos tamaños y alturas con uniones que pueden modificarse en función del grosor del material. Éstas se articulan mediante sencillos nudos diseñados tras explorar distintas uniones a media madera y a flexión que aseguran su rigidez y estabilidad. En todos los casos, tras preparar los archivos de corte ajustando los parámetros a las dimensiones de los tableros se procede a su mecanizado y montaje final encajando las piezas por deslizamiento.



Figura 7: Mobiliario realizado en la asignatura Manufactura Digital del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura (izquierda y centro). Mesa realizada por Guillermo Sánchez Sotés, Sofía Quiroga (diseño) y Epifanio Lorenzo (fabricación digital) para la asignatura Manufactura Digital (derecha).

Tecnologías de Corte

Con tecnologías de corte se ha investigado sobre sistemas estructurales generados a partir de desarrollos poliédricos adaptativos²⁷, como es el caso de las cerchas modulares (Figura 8) basadas en una *octet truss* o cercha de módulo octaedro-tetraédrico que sirvieron como punto de partida para la construcción de un modelo colectivo que implementaba variaciones de tipo topológico atendiendo a cuestiones de proximidad, compacidad o consistencia del modelo a proyectar y fabricar²⁸. La asignatura exploraba aspectos teóricos que iban desde conceptos avanzados de trigonometría esférica hasta ideas como efimerización o customización de la producción industrializada gracias al potencial proporcionado por el uso de la tecnología de corte láser.

Con objetivos similares se desarrolló otro proyecto basado en la estructura de los cuasi-cristales, una forma de cristalización que no emplea una base geométrica convencional de cuatro o seis pliegues sino de cinco, lo que permitía ocupar el espacio con dos poliedros de caras iguales, pero conformando patrones de madozado no periódicos, es decir de infinita variación. El proyecto se materializó en la forma de una estructura agregable y de uniones compatibles e intercambiables que permitía diferentes configuraciones, profundizando gracias a su fabricación en su geometría y sus consecuencias estructurales.

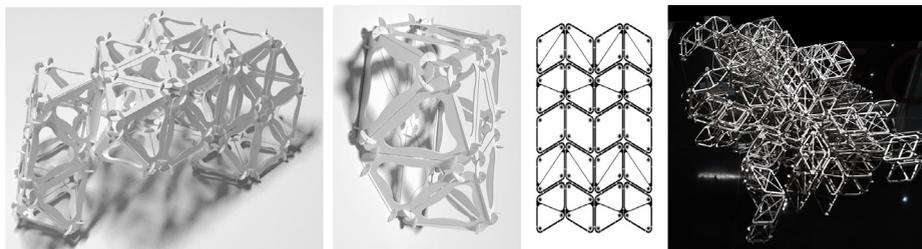


Figura 8: Maquetas realizadas por los alumnos Ricardo Casas, María del Castillo, Pablo Cosín, Jorge Cuartas, Raúl Fernández, Daniel Fernández, Luis González, Adolfo Gutiérrez, Alberto Iranzo, Selina Lainez, Cristina Martínez, Fernando Miñarro, Gabriel Muñoz, María J. Pérez y Natalia Visedo en el Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura. Profesores: Diego García Setién e Ignacio Prieto.

²⁷ Véase: BORREGO, I.; GARCÍA GERMÁN, J.; GARCÍA-SETIÉN, D.; RIBOT, A. (2009) *Colaboratorioetsam*, Maira Libros, Madrid.

²⁸ La maqueta fue diseñada y fabricada en el módulo de Tecnologías de Corte Láser del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Diego García Setién e Ignacio Prieto con la participación de los alumnos Ricardo Casas, María del Castillo, Pablo Cosín, Jorge Cuartas, Raúl Fernández, Daniel Fernández, Luis González, Adolfo Gutiérrez, Alberto Iranzo, Selina Lainez, Cristina Martínez, Fernando Miñarro, Gabriel Muñoz, María J. Pérez y Natalia Visedo.

El corte láser se emplea también en el módulo de Análisis Experimental de Estructuras²⁹ donde se exploran distintas tipologías estructurales analizando sus respuestas a acciones dinámicas (Figura 9). Los alumnos organizados en grupos de trabajo diseñan y construyen maquetas que incorporan dispositivos avanzados de diseño sismo-resistente, que se ponen a prueba al finalizar el curso durante el Concurso de Rodeo Estructural, en el que se premia a la estructura que más tiempo resista un terremoto simulado. Para poder llevar a cabo el concurso se fabricó una máquina de simulación sísmica para poder someter a las maquetas a una sollicitación en escala creciente de frecuencias entre uno y veinte Hertzios.

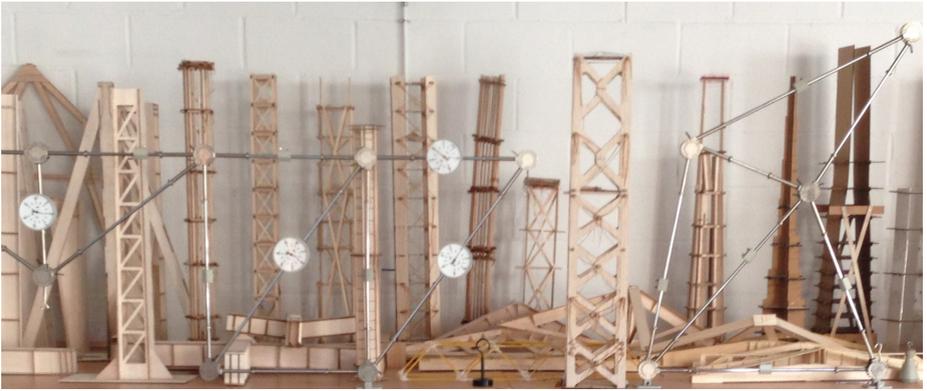


Figura 9: Maquetas realizadas por los alumnos del módulo de Análisis Experimental de Estructuras del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura. Profesores: Félix Hernando Mansilla, Federico Prieto y Maribel Castilla.

Para asegurar la equidad en el concurso, el material proporcionado a cada grupo de alumnos incluye una base de madera cuadrada de veinte centímetros de lado; cinco listones de madera de balsa de un metro de largo y unas pesas de distinto calibre. Se fija una altura mínima para la estructura de un metro permitiendo la colocación sobre ella de elementos de fijación de masas a sesenta centímetros de altura y en coronación. Las maquetas deben incluir dispositivos de diseño sismo-resistente como aisladores de base, péndulos de acoplamiento inercial, disipadores, masas adicionales y elementos elásticos como gomas o muelles, cuya construcción se admite con cualquier material.

²⁹ El módulo de Dimensionado de Estructuras y Análisis Experimental de Estructuras del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura se imparte por los profesores del área de estructuras Félix Hernando Mansilla, Federico Prieto y Maribel Castilla.

Otra aplicación de la tecnología láser que hemos venido explorando es la realización de moldes para encofrados (Figura 10) de superficies facetadas³⁰ empleando procesos de trabajo que después se aplican al diseño de producto. Los moldes se diseñan en programas de modelado tridimensional y después se despliegan como si de un recortable se tratara para conformar el patrón de corte.

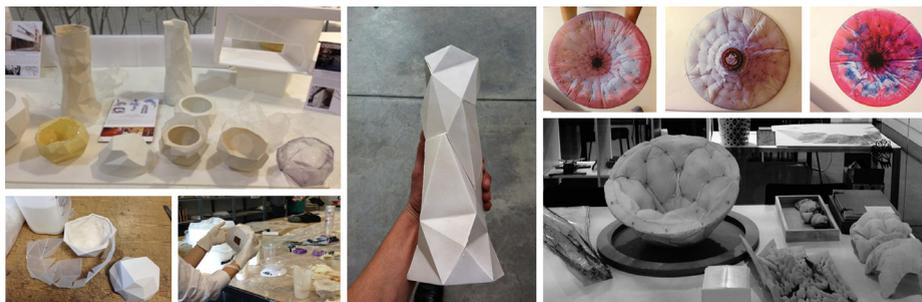


Figura 10: (Izquierda y centro) Prototipos diseñados y fabricados por Sara Alvarellos, Cecilia Bousoño, Mayka García Hípola, Walter Gonzales, Ignacio Paesa y David Pérez durante la asignatura Manufactura Digital 1 (Moldes) del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Jandro Sáenz de Miera, Japi Contonente y Sara Ojanguren (CIO Studio). (Derecha) Prototipos diseñados y fabricados por la arquitecta Ana Moriyón, profesora de la asignatura Manufactura Digital 2 (Moldes).

Empleando como material planchas prensadas de polipropileno, se cortan con láser los patrones que se pliegan conformando el molde que sirve para realizar posteriormente la superficie definitiva con técnicas de roto moldeo.

También se han fabricado encofrados textiles para su aplicación a la arquitectura empleando tecnologías de corte láser. Los modelos se han desarrollado empleando hormigón coloreado con tintes, usando distintos programas de diseño paramétrico que permiten modificar los parámetros de generación formal de las estructuras³¹.

Por otra parte, con tecnología de corte por cuchilla de precisión se han realizado algunos trabajos de gráfica digital para la rotulación con vinilos de pared y vinilos textiles en diversos proyectos de cooperación universitaria o instalaciones

³⁰ Los modelos se diseñaron y fabricaron por Sara Alvarellos, Cecilia Bousoño, Mayka García Hípola, Walter Gonzales, Ignacio Paesa y David Pérez durante la asignatura Manufactura Digital (Moldes) del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por los profesores Jandro Sáenz de Miera, JaPi Contonente y Sara Ojanguren (CIO Studio).

³¹ Los prototipos fueron diseñados y fabricados por la arquitecta Ana Moriyón, profesora de la asignatura Manufactura Digital 2 (Moldes) del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura.

efímeras diseñadas con tecnologías de fabricación digital, reciclando materiales por alumnos de la escuela que se agruparon bajo el nombre Colectivo y Punto. También se diseñarían y fabricarían con esta tecnología los vinilos de pared, suelo y textil de la exposición *Transformad: Taller de Arquitectura. Transformando en tiempo real la ciudad de Madrid* (Figura 11) que organizó la EPS (USP CEU) en el espacio Centro Centro Cibeles del Ayuntamiento de Madrid³².



Figura 11: Proyecto de Gráfica Digital para la exposición *Transformad: Taller de Arquitectura. Transformando en tiempo real la ciudad de Madrid*, coordinada y diseñada por la arquitecta Aurora Herrera. El diseño y la fabricación de los vinilos fueron realizados por el *alumni* Eduardo Chamorro.

Tecnologías aditivas

Empleando impresión 3D hemos tratado de atender a la demanda de los alumnos, sobre todo los más jóvenes, que desean realizar maquetas usando esta tecnología, pero orientándola hacia la realización de maquetas arquitectónicas que favorezcan los procesos proyectuales de los estudiantes y no tanto hacia la representación formal final de sus proyectos (Figura 12). Con impresión 3D nos hemos centrado especialmente en la realización de prototipos que permitan el análisis de elementos constructivos especialmente complejos como los que se encuentran en la uniones entre elementos estructurales.

³² Alumnos de la escuela coordinados por la arquitecta Aurora Herrera (profesora del módulo Diseño Expositivo del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura), trabajaron en el montaje de la exposición *Transformad: Taller de Arquitectura. Transformando en tiempo real la ciudad de Madrid*, organizada en 2014. El diseño y la fabricación de los vinilos para la gráfica digital de la exposición fueron realizados por el alumno Fab Academy (FabLab Madrid CEU) Eduardo Chamorro.

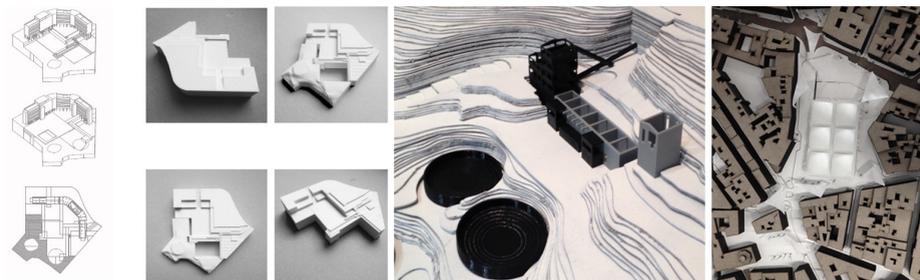


Figura 12: Maquetas de proyectos arquitectónicos realizados por Diego Crisóstomo (izquierda), Alberto Navarro (centro) y Eduardo Chamorro (derecha). Profesores: Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

Entre los proyectos de uniones estructurales destacar el prototipo impreso en 3D que un alumno de arquitectura³³ generó a partir del detalle constructivo de la estructura para su proyecto fin de Grado (Figura 13), puesto que dada su complejidad no conseguía resolverlo sin la ayuda de una maqueta previa. Para ello, despiezó el nudo de la estructura numerando las piezas necesarias, que se modelaron en tres dimensiones teniendo en cuenta las tolerancias que requería el material y a continuación, se comenzó con el proceso de impresión 3D. La versión final del prototipo incluye los elementos de unión articulados que se ajustan a la estructura principal, permitiendo el giro en dos direcciones; las abrazaderas ajustables para los arriostramientos horizontales y verticales de varias piezas y las articulaciones de nudos que conectan las barras de la estructura, todo ello recibido con lo que simula ser la tornillería de acero inoxidable.

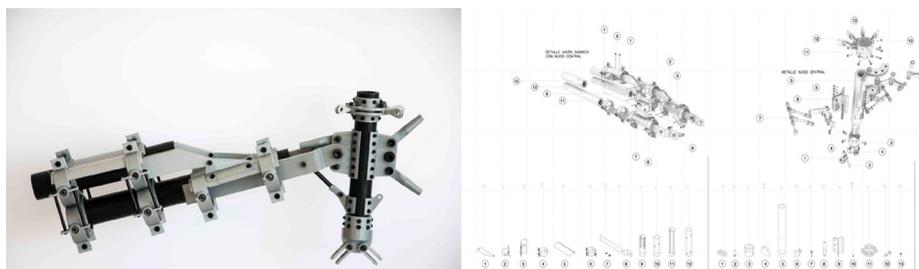


Figura 13: Prototipo de unión articulada fabricado por Rafael García Monje Instructor: Epifanio Lorenzo.

³³ La maqueta se realizó por el alumno de Arquitectura Rafael García Monje sobre un diseño realizado para su proyecto fin de Grado.

Otros prototipos plantean estructuras de acero más complejas, como el modelo realizado con nodos (Figura 14) que actuaban de articulación entre tres, seis e incluso nueve *trusses* metálicos³⁴. Para comprender su funcionamiento y explorar posibles configuraciones en función del número de *trusses* que se conectasen se imprimieron prototipos tridimensionales de los nodos. Igual que en el caso anterior, se empleó la tecnología de extrusión de material por deposición fundida conocida como FDM (*Fused Deposition Modeling*), pero en este caso empleando herramientas avanzadas de impresión 3D que permitiesen solventar los múltiples problemas de retracción del plástico debidos a la complejidad de este modelo.

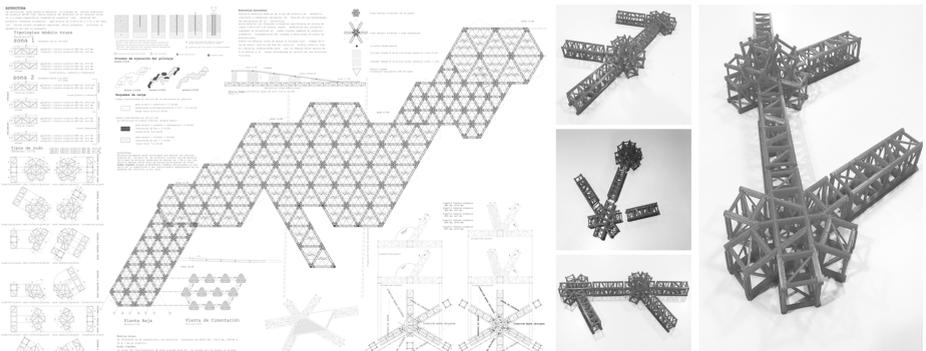


Figura 14: Prototipo de unión articulada fabricado por Javier Abad Instructor: Epifanio Lorenzo.

Otras maquetas en esta misma línea pero fabricadas pieza a pieza y calculando las tolerancias adecuadas permiten además el movimiento (Figura 15), como los kit de montaje que reproducen las estructuras móviles conocidas como *Strandbeest* del escultor Theo Jansen, fabricadas a partir de unas piezas modulares que se ensamblan con conectores impresos en 3D. Éstas encuentran aplicación en el ámbito de la arquitectura en la estructura desplegable *Easy Assembly System* proyectada como una suerte de estructura generadora de espacios arquitectónicos.

³⁴ El prototipo se realizó por el alumno de Arquitectura Javier Abad sobre un diseño realizado para su proyecto fin de Grado.

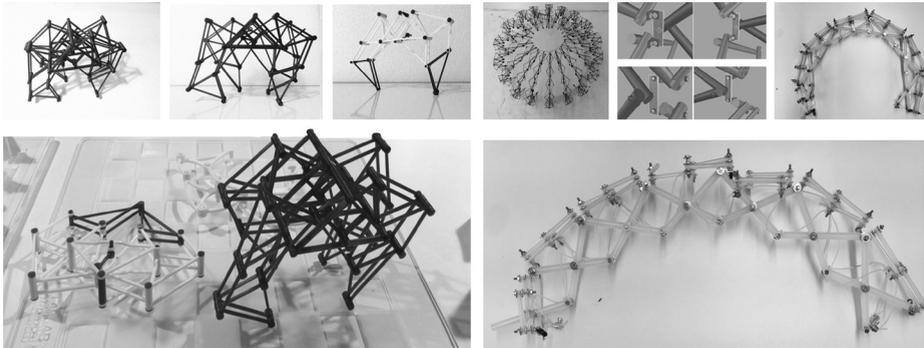


Figura 15: *Strandbeest* (izquierda) por Gonzalo Conde y Alberto Navarro e *Easy Assembly System* (derecha) por Pedro P. Gómez Valdazo. Profesores: Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

También hemos encontrado interesante explorar estructuras de madera que emplean técnicas artesanales buscando su recuperación a partir de tecnologías digitales de última generación. Por ejemplo, se han fabricado prototipos de uniones de carpintería japonesas³⁵ que no emplean tornillos ni elementos de anclaje y que dada su complejidad son difíciles de analizar a partir de representaciones gráficas, aunque sean tridimensionales, porque en la mayoría de los casos su ajuste perfecto requiere de su unión mediante deslizamientos, giros e incluso piezas de madera que actúan a modo de llaves para bloquear el movimiento (Figura 16).

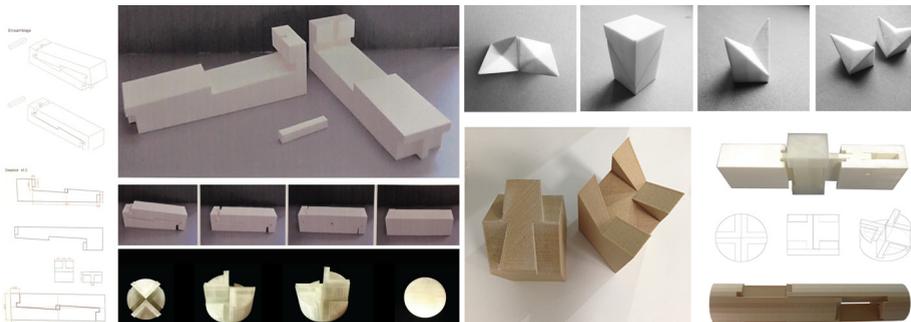


Figura 16: Prototipos de uniones de carpintería tradicional japonesa fabricados por los alumnos Patricia Nieto, Carlos Cámara, Juan Antonio Carreira, Diego Crisóstomo y Carmen Ramos durante el módulo Impresión 3D del Título Propio en Fabricación Digital. Profesores: Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

³⁵ Las piezas se fabricaron en el módulo de Impresión 3D del Título Propio en Fabricación Digital impartido por Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo, por los alumnos Santiago del Águila, Carlos Cámara, J. A Carreira, Diego Crisóstomo, Pedro Gómez Valdazo, J. A. Miguel Velasco, Patricia Nieto, Iván Ordóñez, Carmen Ramos y César Santamaría.

Los complejos cortes maximizan el área de superficie compartida por los elementos de conexión, ayudando a crear un ajuste perfecto al mantenerse unidos por fricción pero al mismo tiempo, su compleja ejecución de modo artesanal las hace inviables para la arquitectura hoy en día, aunque no tanto con técnicas de fabricación digital.

En el mes de septiembre del año 2013, al cumplir con los requisitos necesarios, el laboratorio de fabricación digital consigue la oficialidad y nace FabLab Madrid CEU. Con nuestra incorporación a la red mundial de FabLabs comenzamos a impartir Fab Academy, un programa de alta formación en tecnologías de fabricación digital que comenzó en 2009 con el objetivo de permitir el acceso al curso del MIT “*How to make (almost) anything*” a estudiantes de todo el mundo, utilizando un sistema de videoconferencia para las clases magistrales que se imparten desde Boston y una serie de laboratorios de fabricación digital acreditados, repartidos a lo largo de los cinco continentes, donde los alumnos pueden realizar las prácticas guiados por instructores locales. Con una duración semestral, el programa se ha venido impartiendo desde el año 2014, con lo cual, a la formación que ya veníamos impartiendo en tecnologías sustractivas, de corte y aditivas, se añadió la docencia en el diseño, la fabricación y la programación de circuitos electrónicos, sensores y actuadores, así como clases de manejo de redes y programación de aplicaciones. Gracias a ello, los alumnos de arquitectura que trabajan en el laboratorio han podido implementar sus prototipos y maquetas convirtiéndolas en interactivas.

Entre los prototipos interactivos realizados por alumnos de este programa que ilustran las posibilidades de la combinación de todas estas tecnologías cabe destacar un dron o vehículo aéreo no tripulado (Figura 17), del que se fabricaron dos versiones (uno plegable y un mini-dron). El primero presenta una ventaja destacable frente a otros drones que se comercializan: además de la reducción de coste, sus piezas se pueden plegar ocupando mucho menos espacio que un dron convencional y facilitando su transporte. Para su fabricación se emplearon tecnologías de corte láser e impresión 3D en la elaboración de la parte física (el fuselaje) y placas fresadas en el laboratorio, a las que se soldaron los componentes electrónicos que después se programaron, para la parte electrónica.

La ventaja del segundo prototipo, el mini-dron, es su tamaño mínimo y el uso de *bluetooth* para poderlo pilotar desde un teléfono móvil. Gracias a los drones hemos podido realizar un levantamiento topográfico, dotándolo de una cámara que nos permitió tomar una secuencia de fotografías del terreno, las cuales

introducimos posteriormente en un programa de fotogrametría que nos facilitó los datos necesarios en base a una nube de puntos.

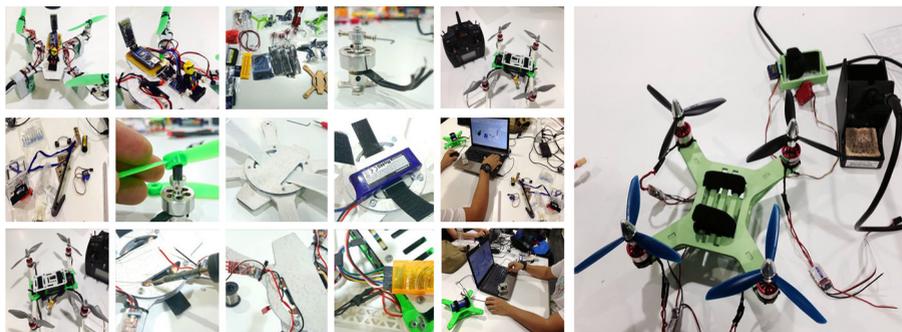


Figura 17: Dron fabricado por el alumno de Fab Academy (FabLab Madrid CEU), Eduardo Chamorro. Profesores: Neil Gershenfeld y Epifanio Lorenzo (instructor local).

Otros proyectos realizados por alumnos del programa Fab Academy³⁶ se centran en prototipos de algunas partes de sus proyectos de fin de Grado en Arquitectura (Figura 18), como es el caso de un panel de cerramiento para un edificio interactivo con el medio ambiente, dotado de unos sensores incorporados en la carpintería que se activan ante una determinada temperatura, conectados a su vez a unos servomotores integrados que permiten su apertura para favorecer la temperatura y ventilación del espacio interior, buscando una mayor sostenibilidad medioambiental.

En esta misma línea destaca otro proyecto de fachada interactiva en el que una serie de paneles modulares reflejan en su cara exterior, a través de luces *leds*, la actividad que ocurre en el interior del edificio. Ésta se registra con una serie de sensores de distancia situados en la cara interior de los paneles que activan *leds* iluminando la fachada e identificando el nivel de ocupación del edificio y su actividad. Finalmente, mencionar otra propuesta que materializaba la idea de un *showroom* expositivo en el que se mostraban objetos de diseño. Unos sensores de presencia en el suelo conectados con unos motores permiten que, a medida que las personas caminan por el espacio expositivo los objetos se aproximen o se alejen conformando una instalación interactiva con el usuario.

³⁶ El programa Fab Academy se imparte desde el Center for Bits and Atoms del MIT. El profesor Neil Gershenfeld ofrece las clases magistrales gracias a un sistema de videoconferencia y los alumnos realizan en FabLab Madrid CEU las prácticas guiadas por Epifanio Lorenzo, el instructor local.

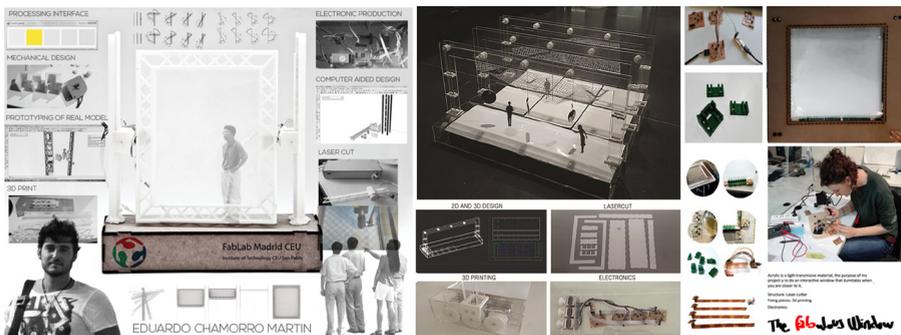


Figura 18: Proyectos interactivos fabricados por alumnos en el Programa Fab Academy: cerramiento interactivo fabricado por Eduardo Chamorro (izquierda), *Interactive Showroom* por María Santisteban (centro) y *Fabulous Window* por Victoria Retana (derecha). Profesores: Neil Gershenfeld y Epifanio Lorenzo (instructor local).

Fabricación Digital en la docencia de Ingeniería

Fab Academy ha permitido, no solamente implementar los prototipos fabricados por los alumnos de arquitectura con la incorporación de componentes electrónicos, sino que dado su carácter interdisciplinar, ha facilitado la integración en el laboratorio de estudiantes de las distintas titulaciones de ingeniería interesados en este tipo de formación para llevar la fabricación digital a su disciplina. Para hacerles partícipes de las tecnologías del FabLab, en el año 2013 comenzamos a impartir cursos de electrónica para alumnos de Ingeniería Informática y de Telecomunicaciones; Impresión 3D para Ingeniería Biomédica y fresado de placas para circuitos electrónicos a un grupo de alumnos que necesitaban esta tecnología para desarrollar sus proyectos académicos³⁷. También hemos impartido formación en Codemotion, el encuentro de desarrolladores que cada año organiza el Departamento de Tecnologías de la Información, impartiendo diversos cursos y talleres, como el Taller de Arduino³⁸, el Taller *Smart Textiles*³⁹, donde fabricábamos tejidos interactivos colocando en ellos unos sensores capacitivos y

³⁷ Los cursos de electrónica, impresión 3D y fresado de placas para ingenieros comenzaron a impartirse en el año 2013 por Epifanio Lorenzo, técnico del Laboratorio de Fabricación Digital FabLab Madrid CEU.

³⁸ El Taller de Arduino fue impartido por Epifanio Lorenzo como parte de los talleres de Codemotion, organizado por el Departamento de Tecnologías de la Información de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo en noviembre de 2014.

³⁹ El Taller *Smart Textiles* fue impartido por la arquitecta Sara Alvarellos en noviembre de 2014, en paralelo a las actividades del congreso Codemotion organizado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo.

empleando plataformas Arduino o el Taller de Micro-cohetes (Figura 19) en el que participaron alumnos de Ingeniería, Arquitectura y estudiantes de Bachillerato Tecnológico del Colegio CEU Montepíncipe.

En el taller, en el que participaron profesores del Instituto Aeroespacial (INSTAE),⁴⁰ los alumnos organizados por grupos de trabajo asistieron a clases teóricas que les permitieron desarrollar el diseño más óptimo para el fuselaje, tras lo cual se centraron en su fabricación empleando las tecnologías del laboratorio. Para Fab-hete, por ejemplo, el cohete que fabricamos en el FabLab, la ojiva, el cuerpo y las aletas se obtuvieron con la impresora 3D y los soportes para sujetar el motor con la máquina de corte láser. También empleamos corte por cuchilla para los vinilos de colores que permitieron localizarlo en el descenso.



Figura 19: Fab-hete: micro-cohete fabricado por Eduardo Chamorro y David Pérez para el Taller de Micro-cohetes. Profesores: Juan Ignacio Rodríguez y Paula Sánchez (INSTAE).

En su interior introdujimos dos paracaídas para recuperar el fuselaje tras el lanzamiento, ya que incorporamos en el cohete un sistema de telemetría con un acelerómetro tri-axial para realizar las mediciones de la trayectoria. Gracias a él obtuvimos los datos relativos a la altura que alcanzó en el concurso que organizamos durante su lanzamiento al finalizar el taller en el aeródromo de Loring. El cohete llegó a los 364 metros de altura, colocándose así en la segunda posición en el ranking europeo de lanzamiento de micro cohetes.

Para los alumnos de la titulación de Ingeniería Biomédica participamos en el verano del año 2015 en el curso de la *Summer University*: “Tecnología biónica en

⁴⁰ El Taller de Micro cohetes fue impartido por Juan Ignacio Rodríguez y Paula Sánchez del Instituto Aeroespacial (INSTAE) con la participación de los alumnos Pablo Calleja, Álvaro Serrano, David Pérez, Eduardo Chamorro, Alicia Bustillo, Adrián Chamorro, Pilar Herrero, Esperanza Cobo, Wendy Lu Chen, Carlota García, Gema Andrés, Teresa Cabrera, María Jurado, Gonzalo Morales, Francisco Fernández, María Alcerreca, Belén Marzal y Leticia González.

Medicina: prótesis, órtesis y órganos biónicos”⁴¹ organizado por la EPS en colaboración con el CSIC. Nuestra participación consistió en la impartición del taller “Fabricación de prótesis activas de mano”, donde formamos a los alumnos en impresión 3D para la fabricación de prótesis, así como para el diseño, fabricación y programación de los circuitos electrónicos que permiten su activación a partir de las señales recogidas por un sensor de electromiograma. Los modelos de prótesis que se fabricaron en este taller son versiones algo más simplificadas de un prototipo desarrollado en el laboratorio para fabricar una prótesis de brazo de bajo coste realizada íntegramente con la tecnología del FabLab. El prototipo (Figura 20) se basa en las prótesis diseñadas por la comunidad *Enable the Future*, a la que pertenecemos y con la que desarrollamos diseños de prótesis para impresión 3D que compartimos de forma gratuita en la web.

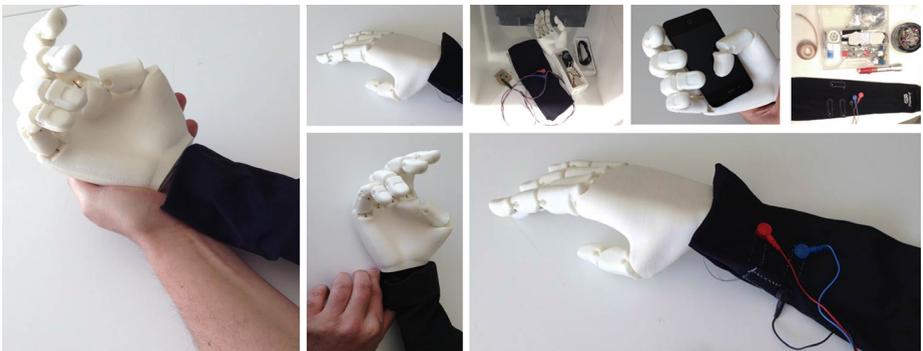


Figura 20: Prótesis de brazo de bajo coste basada en las realizadas por *Enable the Future* fabricada por Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo para ser realizada íntegramente con la tecnología de un FabLab.

La prótesis⁴² es apta para una persona con amputación de mano y consta de una pieza impresa en 3D que se ajusta al antebrazo y que contiene la electrónica, que va unida, a su vez, a la prótesis de mano. Los dedos de la prótesis incorporan unos conectores impresos en 3D con un plástico flexible que mejora considerablemente su movimiento y un juego de cordones rígidos que se conectan a un servo motor, cuyo giro permite la tensión que cierra los dedos de la prótesis.

⁴¹ El taller se enmarcó dentro del curso de la *Summer University*: “Tecnología biónica en Medicina: prótesis, órtesis y órganos biónicos”, organizado por Abraham Otero, coordinador del Grado en Ingeniería Biomédica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo.

⁴² El prototipo fue desarrollado por Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo basándose en un modelo original de la comunidad *Enable the Future*, realizando implementaciones y rediseñando íntegramente las placas electrónicas con la tecnología del FabLab.

El motor es activado empleando la señal eléctrica que recibe del músculo del brazo al contraerse, registrada a través de un sensor de electromiograma y captada gracias a unas tiras de tejido inteligente conductivo que se fijan a la pieza de tela que cubre el brazo. Gracias a él la prótesis es algo más comfortable que otros modelos que emplean en su lugar electrodos de ventosa. La electrónica de la prótesis ha sido diseñada y fabricada en su totalidad con la tecnología del laboratorio desarrollándose una placa integrada que aúna el sensor y el micro-controlador para que ésta pueda ser fácilmente replicable a bajo coste. Se diseñó el circuito, se fabricó la placa (empleando una fresadora de precisión), se soldaron los componentes y finalmente se programó ajustando mediante las correspondientes pruebas el sensor a la fuerza del músculo. El proyecto ha sido nominado para los *Stanford Medicine X Health Care Design Awards* en la categoría *Collaboration in Health Care* orientado a proyectos innovadores en el campo de la salud.

Al implantar el programa Fab Academy adoptamos también las dinámicas pedagógicas participativas e interactivas que emplean en el MIT, donde los docentes adoptan una función facilitadora del aprendizaje orientada a fomentar un espacio de trabajo colaborativo donde es posible el intercambio de conocimientos con los alumnos y entre los alumnos⁴³. Siguiendo esta línea, cada año se requiere a los alumnos de este programa que realicen una práctica conjunta con otros compañeros con un objetivo algo ambicioso: la fabricación de una máquina. La idea es que los FabLabs no sólo facilitemos la fabricación de productos sino también que construyamos nuestras propias máquinas de fabricación. Así hemos desarrollado algunas máquinas como impresoras 3D (Figura 21), en la línea del proyecto RepRap, fabricadas por alumnos de arquitectura que deseaban disponer de su propia impresora.

⁴³ PAPERT, S. (1993) *The Children's Machine. Rethinking School in the Age of the Computer*, Basic Books, Nueva York.

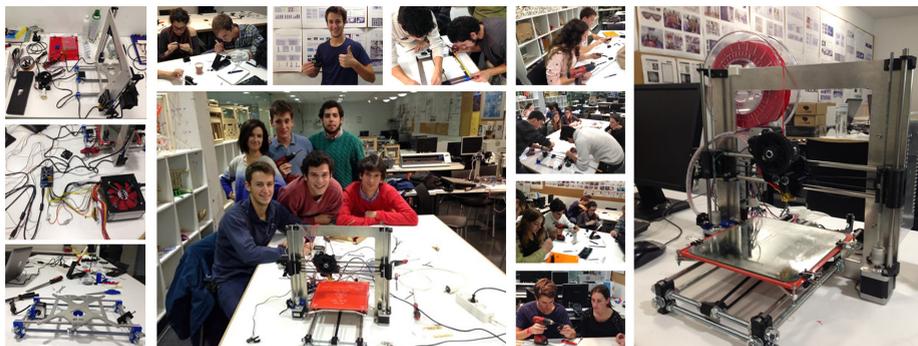


Figura 21: Fabricación de impresoras 3D por los alumnos Mateo Alfaro, Álvaro Blay, Lola de Castro, Eloise Corpas, Diego Cubillos, Louis Lacorne, Víctor Mora, Fernando Navarrete, Ignacio Paesa, Andrea Puebla, Elena Silvestre y Lucía Simón. Profesores: Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

Por otra parte, durante la práctica conjunta asociada a la fabricación de una máquina, trabajamos con los kits de componentes facilitados por el MIT creados a partir del proyecto de investigación de Nadya Peek⁴⁴, que incluyen un juego de módulos dotados con motores y drivers con los cuales es posible ensamblar cualquier tipo de máquina fácilmente. Con ellos se ha diseñado y fabricado una máquina de realidad aumentada⁴⁵ (Figura 22) que dibuja en base a una serie de coordenadas que le proporcionamos. Una cámara de video registra el espacio real en el que estamos trabajando y el programa diseñado lo convierte en un espacio virtual en dos dimensiones donde podemos dibujar. A medida que vamos dibujando en el espacio virtual, la máquina va calculando las coordenadas obtenidas mediante la perspectiva que ofrece la imagen y se posiciona de manera precisa sobre las coordenadas que recibe, conformando punto a punto un dibujo de precisión.

También se ha diseñado y fabricado una máquina de corte de hilo caliente manejada por ordenador⁴⁶. Los módulos que conforman la parte física de la máquina se fabricaron con madera empleando tecnología de corte láser. Una serie de piezas impresas en 3D permiten la sujeción del hilo de corte a la estructura sobre la que se desplazan los motores que permiten el movimiento de la pieza a cortar

⁴⁴ PEEK, N. (2015) *Making Machines that Make: Object-Oriented. Hardware Meets Object-Oriented Software*, op. cit.

⁴⁵ La máquina de realidad virtual fue fabricada por el alumno de Fab Academy (FabLab Madrid CEU) Alejandro Escario. Profesores: Neil Gershenfeld, Nadya Peek y Epifanio Lorenzo (instructor local).

⁴⁶ La máquina fue diseñada y fabricada por los alumnos del programa Fab Academy 2016 María Santisteban, Victoria Retana, Luis Díaz, Paco González, Borja Lanza, Marta Verde y José Real.

en los tres ejes principales y a través de un movimiento de rotación para realizar cortes de mayor complejidad. La máquina además, se desmonta con facilidad permitiendo su fácil transporte.

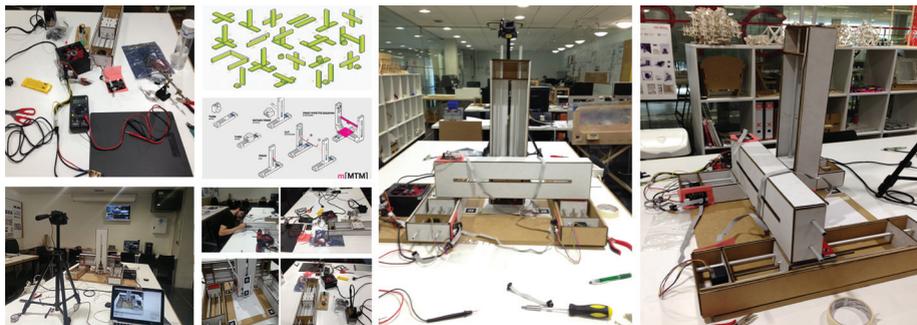


Figura 22: Máquina de realidad virtual fabricada por el alumno de Fab Academy (FabLab Madrid CEU) Alejandro Escario. Profesores: Neil Gershenfeld, Nadya Peek y Epifanio Lorenzo (instructor local).

En el año 2011, tres años después de comenzar a impartirse Fab Academy desde el MIT, surgirían otras iniciativas relacionadas con programas de formación online como Udacity liderada por Sebastian Thrun de la Universidad de Stanford una universidad en la red con la que pretendía impartir formación de alta calidad a estudiantes que no dispusieran de recursos económicos para costearse la asistencia presencial. A ésta le seguiría más adelante Coursera y un año después edX, un consorcio sin ánimo de lucro entre Harvard y MIT. Con todas ellas se generó un fenómeno educativo denominado *Massive Open Online Courses* (MOOC), que vendría a traducirse como cursos abiertos y masivos por internet. Como se ha venido apuntando en los últimos años, este fenómeno es el comienzo de una revolución en el campo de la educación que está desbancando a la formación tradicional. La Comisión Europea, consciente de ello ha definido una línea estratégica en el programa *Horizon 2020*, en cuyo marco la EPS está participando junto con trece socios en el Proyecto de Investigación Newton.

El proyecto Newton trata de mejorar los programas de educación que se ofertan a través de internet con programas interactivos que incorporan nuevas tecnologías y distribución de contenido multimedia y mulsemmedia para fomentar la integración social, combatir el abandono escolar y promover la integración de estudiantes con discapacidad. FabLab Madrid CEU participa gracias a los fondos de la Comisión Europea que ha financiado la ampliación del laboratorio duplicando

su infraestructura para poder desarrollar el proyecto sin afectar a los programas formativos del FabLab, que requieren del uso de la maquinaria de manera continuada durante todo el curso académico. El objetivo que se persigue es la virtualización del laboratorio de fabricación digital, de manera que los estudiantes puedan acceder a toda esta infraestructura desde interfaces instaladas en sus ordenadores personales.

El proyecto incluye el desarrollo de una plataforma *on-line* desde la que sea posible impartir este tipo de formación, que están desarrollando nuestros compañeros del Departamento de Tecnologías de la Información, liderados por el profesor Gianluca Cornetta y su puesta en práctica, para lo cual en el FabLab estamos diseñando cursos de formación *on-line* que capaciten a los estudiantes para diseñar y fabricar sus prototipos empleando técnicas de gamificación y realidad aumentada así como tecnologías *multimedia* que permitan a alumnos con discapacidad visual, auditiva, física o intelectual acceder también a los contenidos y al FabLab.

Además de incorporar estas nuevas tecnologías al ámbito de la formación, Newton va a permitir ampliar el perfil de usuarios del laboratorio, para incluir además a los alumnos de educación secundaria y bachillerato de los Colegios CEU repartidos a lo largo de nuestro país. Continuaremos así con la línea de programas que hemos venido desarrollando estos años enfocados a estos alumnos⁴⁷ y que comenzamos en el año 2012 con el programa *Learning Architectural Drawing* (Figura 23), orientado a alumnos de Bachillerato interesados en la titulación de Arquitectura. Durante dos semanas consecutivas en verano se sucedieron un taller de maquetas y módulos de pintura, dibujo y geometría empleando tecnologías digitales dirigidas al análisis de un edificio representativo de la ciudad de Madrid. Organizamos este programa durante dos veranos con gran éxito y a partir de entonces la organización pasó a la coordinadora del Grado en Diseño⁴⁸, quien incorporó además contenidos relacionados con esta nueva disciplina y ha seguido contando con nosotros para desarrollar los talleres de fabricación de maquetas que se incluyen en el programa.

⁴⁷ BLIKSTEIN, P. (2013) *Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention. In FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors*. WALTER-HERRMANN, J. & BÜCHING, C. (Editores), Bielefeld: Transcript Publishers.

⁴⁸ Actualmente se ofertan dos programas de verano dirigidos por la Coordinadora del Grado en Diseño, Sonia Izquierdo, denominados Curso en Fundamentos de Diseño y Arquitectura y Curso en Fundamentos del Dibujo para Diseño y Arquitectura. FabLab Madrid CEU participa en estos programas ofreciendo cada año talleres de fabricación digital integrados en estos programas.



Figura 23: Programa *Learning Architectural Drawing* impartido por los profesores: Guadalupe Cantarero, Rocío Carvajal, Pablo Delgado, Aitor Goitia, Covadonga Lorenzo, Belén Hermida, Sonia Izquierdo, Clara Maestre, Juan Roldán, Alberto Sanjurjo y Fátima Sarasola.

También participamos desde hace cinco años en el programa de Preuniversitarios Tecnológicos organizado por Escuela Politécnica Superior para los alumnos de los colegios CEU de la Comunidad de Madrid, impartiendo los módulos asociados a la fabricación digital orientados a la construcción de estructuras. Hemos colaborado también en otras iniciativas como *CEU Talks* o las actividades vinculadas con la Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid y la Semana de la Arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, acercando las tecnologías a los más jóvenes.

Fabricación Digital y Aprendizaje Servicio Solidario

Hoy en día, la experiencia de aprendizaje no sólo está pasando de los recintos cerrados de las aulas tradicionales al espacio virtual de Internet, sino que también se está empezando a proyectar sobre nuestro entorno social. Actualmente, miles de alumnos de centros de primaria, secundaria y educación superior en todo el mundo participan en lo que se denomina Aprendizaje Servicio Solidario (ApSS), una pedagogía que combina el currículo académico con el servicio comunitario como vía para enriquecer la experiencia educativa, enseñar civismo y animar a la implicación social. En los Estados Unidos y en algunos países de Europa esta pedagogía ha pasado de ser una actividad complementaria a constituirse como eje vertebrador de algunas asignaturas principales en instituciones de educación universitaria, donde se concibe la universidad como espacio y actor transformador de la sociedad.

En FabLab Madrid CEU hemos podido comprobar los beneficios de estas experiencias de aprendizaje, ya que desde el comienzo de nuestra trayectoria hemos incorporado proyectos enfocados a resolver necesidades de tipo social en los distintos programas docentes. Así, nuestro primer trabajo fue para el proyecto ‘Hacia un Makeni más Sostenible’⁴⁹ dirigido por el Coordinador de Cooperación Internacional, Luis Perea, en colaboración con la Universidad de Makeni. Tras un primer viaje a Sierra Leona donde trabajamos en la construcción de un edificio del campus y al ser conscientes de la falta de financiación para su amueblamiento, decidimos a nuestro regreso a Madrid diseñar y fabricar el mobiliario durante un taller de fabricación digital (Figura 24).



Figura 24: Proyecto de mobiliario para la *Guest House* de la Universidad de Makeni, Sierra Leona. El mobiliario se desarrolló durante la asignatura Manufactura Digital 1 del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Guillermo Sánchez Sotés, Sofia Quiroga (diseño) y Epifanio Lorenzo (fabricación digital). El montaje final se realizaría en colaboración con los alumnos de carpintería de *St. Joseph School for the Hearing Impaired* en Makeni: Sister Romina, Junisal Lavalie, Brima Marah, Alie Fullah, Brima Bangura, Alie Thoronka, Hassam Bangura, Alpha Kamara, Brima Konteln, Brima Karabo y Hassam Joseph Sessay. Participantes de la EPS: Clara Abella, Santiago del Águila, Carlos Altozano, María Álvarez, Claudia Andino, Pablo Benito, Belén Collado, Marta Leboeiro, Covadonga Lorenzo, Salvador Oriarch, Sofia Quiroga, Luis Perea, Daniel Pérez, Guillermo Sánchez y Enrique Sánchez.

Sabíamos que a la vuelta a la ciudad de Makeni contaríamos con el apoyo de los alumnos de la escuela de carpintería *St. Joseph School for the Hearing Impaired* con los que ya habíamos trabajado en el primer viaje y que dispondríamos de madera a un precio muy asequible. Se diseñaron⁵⁰ unas piezas de madera muy ligeras que se fresaron en la máquina de control numérico y que llevamos como

⁴⁹ Véase: VV. AA. (2013) *Towards a Sustainable Makeni (Hacia un Makeni más Sostenible)*, CEU Ediciones, Madrid.

⁵⁰ El mobiliario se desarrolló durante la asignatura Manufactura Digital 1 del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura impartido por Guillermo Sánchez Sotés, Sofia Quiroga (diseño) y Epifanio Lorenzo (fabricación digital). El montaje final de los muebles se realizaría en colaboración con los alumnos de carpintería de *St. Joseph School for the Hearing Impaired* en Makeni.

equipaje de mano repartidas entre los voluntarios. Una vez allí, empleando estas piezas y tableros de madera que compramos a buen precio se construyeron los muebles. Una única pieza modular sirvió para fabricar todo lo necesario: mesas, sillas, taburetes, bancos y baúles que actuaban a modo de armarios. Para los módulos empleamos tableros de madera de diecinueve milímetros de espesor, ensamblados con medio juntas a solape a presión que permitían el desmontaje y ensamblaje en distintas configuraciones según las necesidades.

El segundo proyecto se realizó durante un taller intensivo que exploraba, como en el caso anterior, la combinación de tecnologías artesanales y digitales. Colaboramos con el arquitecto peruano Walter Gonzales que está involucrado en un proyecto de recuperación de la artesanía local para mejorar la economía en aldeas desfavorecidas de su país natal, implementando el diseño y fabricación de un telar tradicional (Figura 25) con tecnologías de fabricación digital.

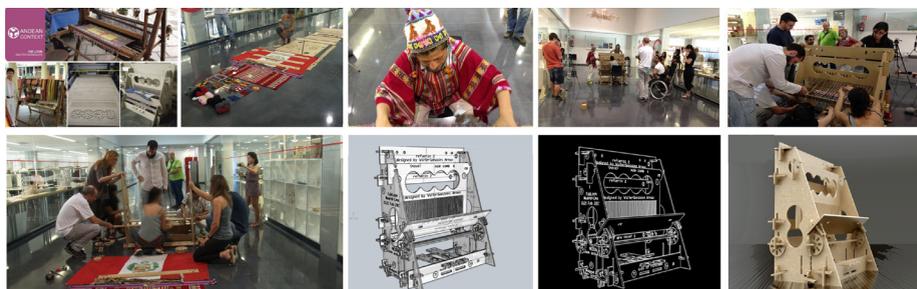


Figura 25: Proyecto *FabLoom* del arquitecto Walter Gonzales. Taller intensivo para la fabricación de un telar tradicional con la participación de FabLab León, Makespace Madrid y FabLab Madrid CEU.

En Ecuador participamos en un proyecto de arqueología social centrado en el estudio del yacimiento arqueológico de Quillusara. La colaboración del FabLab se centró en la aplicación de tecnologías digitales para el levantamiento tridimensional de los ortostatos del complejo empleando técnicas de fotogrametría y escaneo tridimensional, así como el registro de los petroglifos grabados sobre la superficie de dichos ortostatos utilizando termografías. El empleo de un escáner tridimensional para registrar dichas superficies reveló la existencia de unos petroglifos que permitieron datar dicho asentamiento arqueológico⁵¹. Los

⁵¹ SANZ, S.; B. AGUIRRE, E.; ARÉVALO, H.; BALCAZAR, C. A.; GONZÁLEZ, D. S.; SIMALUIZA, R. J.; SANCHÍZ, H.; LORENZO, C. y LORENZO, E. (2014) "Quillusara, Entrance to the Past. Megalithic Phenomenon in Ecuador", *Actas del XVII Congreso Mundial de la Unión Científica Internacional de Ciencias Prehistóricas y Protohistóricas (UISPP)*, Burgos.

trabajos se realizaron en el taller de verano de Arqueología de la Arquitectura del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura, impartido por Sofía Sanz González de Lema, Hipólito Sanchíz Álvarez de Toledo, Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.

En estos momentos estamos colaborando en un proyecto solidario para el orfanato St. Helene ubicado Kenscoff, un lugar a unos veinticinco kilómetros de Puerto Príncipe en Haití, donde han encontrado en una actividad lúdica como el ajedrez, un medio de enseñar a los niños jugando. A través de un equipo de voluntarios se han enviado juegos de ajedrez fabricados en el laboratorio durante un taller de modelado tridimensional e impresión 3D. Durante el taller se fabricaron las piezas y algunos moldes para la fabricación de juegos con otros materiales, así como un juego de ajedrez de pared para facilitar la enseñanza de esta disciplina.

Otro proyecto para el que empleamos impresión 3D son las prótesis de bajo coste (Figura 26) para niños y adultos que las necesitan y no pueden acceder a una prótesis convencional por su elevado coste⁵², por las que hemos recibido el Primer Premio al Proyecto Solidario de los Premios El Mundo & Adecco. Hemos fabricado ya prótesis de mano para dos niños que carecen de los dedos de una mano y prótesis de brazo para un adulto y un niño que carecen de la mano y parte del antebrazo.



Figura 26: Proyecto de prótesis de bajo coste realizadas en los cursos de impresión 3D de FabLab Madrid CEU con la participación de los alumnos Carlos Cámara, María Eugenia Carrizosa y Pedro P. Gómez Valdazo. Profesora: Covadonga Lorenzo.

⁵² LORENZO, C. (2015) "Prótesis de mano con tecnologías de impresión 3D", *Ortopedia y Geriatría Profesional* (Revista Técnica para profesionales de la geriatría y la ortopedia), vol. 3, Grupo Editorial Editec, Madrid.

El procedimiento de fabricación de las prótesis de mano parte de un modelo tridimensional del prototipo a partir del cual se imprimen cada una de las piezas, que después se acoplan empleando cordones elásticos e hilos de nylon que van desde la falange hasta la pieza que conforma el dorso de la mano. Estos hilos actúan como los tendones flexores de la mano permitiendo el movimiento de presión cuando se produce la flexión de la muñeca. Las prótesis de brazo se fabrican también con impresión 3D aunque en este caso, las piezas que cubren el antebrazo y el brazo son sometidas a un pos-formado para adquirir la forma final. La flexión de los dedos de la prótesis se produce, en este caso, con el movimiento del codo.

El último proyecto a mencionar es una incubadora de bajo coste realizada por un alumno de ingeniería durante el programa Fab Academy⁵³, que se encuentra ya funcionando en maternidades de tres países del continente africano y que ha sido galardonado como *Best Medical Project* en los *Global Fab Awards*, lo que ha permitido a su autor presentar el proyecto en el congreso internacional *Medicine X* que se celebra cada año en Stanford University. La incubadora (Figura 27) tiene una estructura de madera fabricada gracias a una máquina de control numérico, con varias piezas de plástico realizadas en una impresora 3D, a lo que se suma la electrónica para la que se han diseñado, programado y fabricado los circuitos electrónicos que permiten el funcionamiento del termostato, el ventilador, el calefactor y el humidificador que mantienen las condiciones de temperatura y humedad convenientes para el bebé. Además, las patas en tijera permiten la inclinación de la cama para el tratamiento de ciertas patologías.

Tras varios prototipos, el último modelo mejora el aislamiento para reducir considerablemente la cantidad de aire a acondicionar de forma que la electrónica se ve menos estresada; asegura una ventilación apropiada en la incubadora teniendo en cuenta los parámetros de confort, apoyándose para ello en modelos computacionales de dinámica de fluidos y añade al módulo de temperatura y humedad dos nuevos módulos: uno para el tratamiento de la ictericia y otro para la gestión de la energía y la alimentación por batería.

⁵³ La incubadora fue diseñada por el alumno Alejandro Escario durante el programa Fab Academy (FabLab Madrid CEU). Profesores: Neil Gershenfeld, Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo.



Figura 27: Proyecto de incubadora de bajo coste diseñada por el alumno de Fab Academy (FabLab Madrid CEU) Alejandro Escario. Profesores: Neil Gershenfeld, Epifanio Lorenzo y Covadonga Lorenzo. El último modelo de la incubadora (derecha) ha sido desarrollado por un equipo de voluntarios liderados por Alejandro Escario que cuenta con el apoyo de varios asesores técnicos externos.

Los proyectos aquí presentados han tratado de ilustrar algunas de las aplicaciones de la fabricación digital en la docencia de la Arquitectura y la Ingeniería en nuestra universidad, a partir del trabajo desarrollado por los alumnos y profesores del Laboratorio de Fabricación Digital, FabLab Madrid CEU. También se ha mostrado la posible vinculación de los programas docentes que se imparten a pedagogías de Aprendizaje Servicio Solidario, donde se favorecen espacios de trabajo en el ámbito universitario con potencial transformador de nuestra sociedad y se crean dinámicas de aprendizaje que fomentan proyectos e ideas innovadoras. Es nuestra intención seguir trabajando en esta línea, convencidos de que el laboratorio de fabricación digital puede aportar a la comunidad universitaria un espacio de innovación tecnológica y pedagógica generador de proyectos que pueden llegar a impactar de forma positiva en nuestra sociedad.

“Give ordinary people the right tools and they will design and build the most extraordinary things”.

Neil Gershenfeld.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos los alumnos y profesores que han participado en los programas docentes y en los proyectos realizados en FabLab Madrid CEU por su trabajo e ilusión; al técnico del laboratorio e instructor, Epifanio Lorenzo, por su dedicación y empeño, ya que es el alma de muchos de los trabajos que aquí se han mostrado; al equipo rectoral de la Universidad CEU San Pablo por el apoyo institucional; al equipo de dirección de la Escuela Politécnica Superior y muy especialmente, al Director de la Escuela Politécnica Superior, David Santos, sin el cual el laboratorio no estaría en funcionamiento. Agradecerle el respaldo a nuestro trabajo en todas las ocasiones que lo hemos necesitado, la confianza, el apoyo y el trabajo constante que realiza para que proyectos como éste y muchos otros que desarrollan otros compañeros puedan salir adelante. Mencionar al director del Center for Bits and Atoms del Massachusetts Institute of Technology, Neil Gershenfeld, por su apoyo al hacernos partícipes de sus proyectos y programas docentes y al resto de laboratorios y espacios de fabricación digital por compartir su trabajo y facilitar el crecimiento de la red. Gracias también a mis compañeros y a los presentes por la atención prestada.

Referencias

- AGKATHIDS, Asterios (2010) *Digital Manufacturing in Design and Architecture*, BIS Publishers, Amsterdam.
- ALVARELLOS, Sara y GARCÍA, César (2016) *Manual de supervivencia Maker*, Makespace Madrid.
- ANDERSON, Chris (2012) *Makers, the New Industrial Revolution*, Crown Publishers Group, Nueva York.
- BLIKSTEIN, Paulo (2013) *Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention. In FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors*. J. Walter-Herrmann & C. Büching (Editores), Bielefeld: Transcript Publishers.
- BORREGO, Ignacio; GARCÍA GERMÁN, Javier; GARCÍA-SETIÉN, Diego; RIBOT, Almudena (2009) *Colaboratorioetsam*, Marea Libros, Madrid.
- DIRNBÖCK, Hans (1987) *Die Antizyklidenbewegung*, Verlag Heyn, Klagenfurt, Austria.
- DUNN, Nick (2012) *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence King Publishing, Londres.
- GARCÍA, César (2016) *Casi todo por hacer. Una mirada social y educativa sobre los Fab Labs y el movimiento 'maker'*, Fundación Orange, Madrid.
- GERSHENFELD, Neil (2005) *FAB. The Coming Revolution on your Desktop*. Basic Books, Nueva York.
- GERSHENFELD, Neil (2012) "How to Make Almost Anything. The Digital Fabrication Revolution". *Foreign Affairs*, 91/ 6, Council in Foreign Relations, Nueva York.
- HALVERSON, E. R. y SHERIDAN, K. (2014) *The maker Movement in Education*. Harvard Educational Review, 84, vol. 4, Boston, Massachusetts.
- IWAMOTO, Lisa (2009) *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, Princeton Architectural Press, Nueva York.
- KOLAREVIC, Branko (2003) *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Nueva York.

LORENZO, Covadonga (2015) “Prótesis de mano con tecnologías de impresión 3D”, *Ortopedia y Geriatría Profesional*, vol. 3, Grupo Editorial Editec, Madrid.

OBUCHI, Yusuki, (2013) “99 Failures for One Pavilion”, *Domus* (Digital Edition). http://www.domusweb.it/en/architecture/2014/01/07/99_failures_and_onepavilion.html

PAPERT, Seymour (1993) *The Children's Machine. Rethinking School in the Age of the Computer*. Basic Books, Nueva York.

PEEK, Nadya (2015) *Making Machines that Make: Object-Oriented. Hardware Meets Object-Oriented Software*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

PÉREZ DE LAMA, José (2014) *Yes, we are open. Fabricación Digital, tecnologías y cultura libres*, Universidad de Sevilla.

PÉREZ DE LAMA, José; OLMO, Juan José; SÁNCHEZ-LAULHÉ, José María; GUTIÉRREZ, Manuel (2012) “Incorporación del diseño y fabricación digital a la arquitectura: docencia y práctica profesional”. *4I AU IV Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo*. <http://hdl.handle.net/10251/15010>

RIFKIN, Jeremy (2015) *The Zero Marginal Cost Society: The Internet of Things, the Collaborative Commons and the Eclipse of Capitalism*, Palgrave Mcmillan, Nueva York.

SANZ, Sofia; B. AGUIRRE, Eduardo; ARÉVALO, Héctor; BALCAZAR, Cristian A.; GONZÁLEZ, Diego S.; SIMALUIZA, Ruth J.; SANCHÍZ, Hipólito; LORENZO, Covadonga y LORENZO, Epifanio (2014) “Quillusara, Entrance to the Past. Megalithic Phenomenon in Ecuador”, *Actas del XVII Congreso Mundial de la Unión Científica Internacional de Ciencias Prehistóricas y Protohistóricas (UISPP)*, Burgos.

VV. AA. (2013) *Towards a Sustainable Makeni*, CEU Ediciones, Madrid.

COVADONGA LORENZO CUEVA. Arquitecta por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, Especialista en Cooperación para el Desarrollo de Asentamientos Humanos por la Universidad Politécnica de Madrid, Máster en Diseño Arquitectónico por la Universidad de Navarra y Doctor Arquitecto (*Cum Laude*) por la Universidad de Navarra. Tras seis años formando parte del equipo editorial de la revista *Arquitectura Viva & AV Monographs* se dedica a la docencia y la investigación en la Universidad CEU San Pablo. En esta institución ha ejercido seis años como Coordinadora de Relaciones Internacionales y cinco años como Subdirectora de Organización y Recursos Académicos de la Escuela Politécnica Superior. Actualmente es Directora del Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad CEU San Pablo (FabLab Madrid CEU), Profesora del Departamento de Arquitectura y Diseño, Directora del Título Propio en Fabricación Digital para la Arquitectura y Jefa de Redacción de la revista de arquitectura *Constelaciones*. También es miembro del Grupo de Investigación “Digital Fabrication in Distributed Environments” y participa en el proyecto NEWTON “*Networked Labs for Training in Sciences and Technologies of Information and Communication*”, un proyecto de investigación financiado por el Programa Marco de Investigación en Innovación de la Unión Europea denominado Horizonte 2020.