



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Aprendizajes, retos y perspectivas de la fabricación digital en Colombia**

**Roland Dario Sandoval Bolaños**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Arquitectura, Maestría en Construcción  
Medellín, Colombia  
2016



# **Aprendizajes, retos y perspectivas de la fabricación digital en Colombia**

**Roland Dario Sandoval Bolaños**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Construcción**

Director:

Arq. Jorge Fernando Torres Holguín

Línea de Investigación:

Tecnología de la Construcción

Grupo de Investigación:

Interface

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Arquitectura, Maestría en Construcción

Medellín, Colombia

2016



*A mi familia.*



## **Agradecimientos**

Al profesor Jorge Torres por su labor y acompañamiento continuo, como guía de este trabajo y al arquitecto Rodrigo Velasco por sus importantes aportes al mismo.





## Resumen

Esta investigación tiene por objetivo, exponer el proceso de implementación que ha tenido la tecnología digital, representada en *CAD (Diseño Asistido por Computador)*, *CAE (Ingeniería Asistida por Computador)* y *CAM (Manufactura Asistida por Computador)*, también conocida como *Fabricación Digital*, dentro de la industria de la construcción en Colombia en los años recientes y sugerir cuál podría ser su aplicabilidad a futuro. Para tal fin, se describen los aspectos más relevantes de la tecnología digital, tanto en el diseño arquitectónico como en la manufactura para la construcción a nivel global y desde un contexto histórico, lo que permite entender y evidenciar su evolución y aplicaciones. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis sobre la implementación de esa misma tecnología en Latinoamérica, a través de tres áreas principales: Academia, Diseño e Industria. Luego, se procede a determinar en categorías similares, dentro del contexto colombiano, cuáles han sido los factores que han promovido o impedido una implementación más rápida en el diseño y la construcción. Mediante una serie de entrevistas semi-estructuradas, se pretende entonces, conocer el punto de vista de sus participantes.

Finalmente, se hace una reflexión acerca del uso y desarrollo de estas tecnologías, hacia escenarios potenciales de aplicación a mediano plazo dentro del mismo contexto. De todo lo anterior, se obtiene como resultado una serie de conclusiones que permiten conocer y entender los aprendizajes que hasta ahora han dejado algunos esfuerzos en la incipiente implementación de las tecnologías digitales en el país, pero también los retos y perspectivas hacia el futuro.

**Palabras clave:** Construcción, Fabricación Digital, Diseño Computacional, Modelado Paramétrico, Diseño Paramétrico, Diseño Orientado al Desempeño, Colombia.

## Abstract

This research aims to expose the implementation process that digital technology has had in the Colombian construction industry in recent years, represented in CAD (Computer Aided Design), CAE (computer-aided engineering) and CAM (Aided Manufacturing Computer), also known as Digital Manufacturing, and to suggest what might be its applicability in the future. For this purpose, it describes the most important aspects of digital technology, both in architectural design and manufacturing for the construction in a global scale and from a historical context, which allows understanding and demonstrating its evolution and applications. Subsequently an analysis on the implementation of the same technology in Latin America, through three main areas: Academia, Design and Industry, is carried out. Then it aims to determine in similar categories within the Colombian context, what were the factors that have promoted or hampered a faster implementation process in the design and construction industries. Through a series of semi-structured interviews, it seeks to know the point of view of some of its participants.

Finally, it poses a reflection on the use and development of these technologies for potential application scenarios in the near future within the context. From the above, a number of conclusions is obtained as a result, which provide an insight and understanding of the lessons from some efforts made so far in the implementation of emerging digital technologies in the country, but also the challenges and prospects for the future.

**Keywords:** Building Construction, Digital Fabrication, Computational Design, Parametric Design, Parametric Modelling, Performance-Oriented Design, Colombia.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Conceptos Básicos y Antecedentes</b> .....	<b>5</b>
1.1 Diseño Asistido por Computador (CAD), modelado paramétrico y diseño computacional .....	5
1.2 Antecedentes analógicos y digitales del modelado paramétrico .....	13
1.3 Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y procesos de optimización .....	28
1.4 Diseño computacional en la arquitectura y su impacto en la construcción .....	35
1.5 Fabricación digital o Manufactura Asistida por Computador (CAM) .....	39
1.5.1 Fabricación Bidimensional y Sustractiva .....	44
1.5.2 Fabricación Aditiva .....	46
1.5.3 Fabricación formativa .....	53
1.5.4 Fabricación robótica .....	57
1.5.5 Procesos de ensamble.....	64
1.6 Flujos de trabajo: integración de procesos entre diseño, fabricación y construcción .....	67
1.7 Perspectiva del autor .....	69
<b>2. Análisis del Contexto Regional</b> .....	<b>73</b>
2.1 Instituciones educativas .....	73
2.2 Diseñadores .....	90
2.3 Consultores y fabricantes .....	93
2.4 Perspectiva del autor .....	98
<b>3. Análisis del Contexto Local</b> .....	<b>103</b>
3.1 Antecedentes en la construcción .....	103
3.2 Estado actual de los medios digitales en diseño y construcción .....	106
3.3 Diseño metodológico .....	115
3.3.1 Descripción de la muestra.....	118
3.4 Resultados.....	119
3.4.1 Resultados categoría Instituciones académicas .....	119
3.4.2 Resultados categoría diseñadores y consultores .....	124

3.4.3	Resultados categoría fabricantes.....	125
3.5	Conclusiones preliminares .....	127
<b>4.</b>	<b>Reflexión: Escenarios potenciales en el contexto local .....</b>	<b>130</b>
4.1	FabLabs como motores de emprendimiento para la construcción .....	130
4.2	Herramientas digitales aplicadas en las tradiciones constructivas locales ....	131
4.3	Biomateriales y construcción robótica autónoma en sitio.....	134
<b>5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>138</b>
5.1	Conclusiones finales .....	138
5.2	Investigación posterior.....	140
<b>A.</b>	<b>Anexo: Entrevistas .....</b>	<b>143</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>145</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Primeras interfaces computacionales. ....	6
<b>Figura 1-2:</b> Usos y registros de las curvaturas en el diseño. ....	8
<b>Figura 1-3:</b> Tipos de curvas por medios computacionales. ....	9
<b>Figura 1-4:</b> Superficies y métodos de subdivisión por medios computacionales. ....	11
<b>Figura 1-5:</b> <i>Sketchpad</i> , primera interfaz gráfica interactiva. ....	12
<b>Figura 1-6:</b> Sistema para derivación de arcos catenarios.....	17
<b>Figura 1-7:</b> Proceso de <i>form-finding</i> en la obra de Frei Otto. ....	18
<b>Figura 1-8:</b> Parametrización involucrando factores adicionales a los constructivos..	20
<b>Figura 1-9:</b> Histórico comparativo del software interactivo y la programación. ....	21
<b>Figura 1-10:</b> Prototipos de avances computacionales aplicados al diseño.....	23
<b>Figura 1-11:</b> Obras de Frank Gehry. ....	24
<b>Figura 1-12:</b> Aplicación de la CAE para optimización de la forma arquitectónica. ....	31
<b>Figura 1-13:</b> Espacios de diseño desde exploración a explotación. ....	33
<b>Figura 1-14:</b> Exploraciones de variaciones de la forma arquitectónica mediante animación computarizada. ....	36
<b>Figura 1-15:</b> Procesos constructivos optimizados en estructuras de forma libre. ....	42
<b>Figura 1-16:</b> Rangos cinemáticos de la maquinaria CNC y robótica. ....	44
<b>Figura 1-17:</b> Maquinaria CNC bidimensional.....	45
<b>Figura 1-18:</b> Maquinaria cnc de fabricación sustractiva. ....	46
<b>Figura 1-19:</b> Maquinaria de fabricación aditiva.....	47
<b>Figura 1-20:</b> Impresoras 3d de escritorio del sistema FDM. ....	48
<b>Figura 1-21:</b> Sistemas de fabricación aditiva de gran tamaño.....	50
<b>Figura 1-22:</b> Prototipos impresos con sistemas de gran tamaño.....	50
<b>Figura 1-23:</b> Diseño computacional y fabricación aditiva con materiales metálicos....	52
<b>Figura 1-24:</b> Producción de moldes negativos por fabricación aditiva para fundición de piezas de acero. ....	52
<b>Figura 1-25:</b> Fabricación aditiva con materiales tradicionales y alternativos. ....	53
<b>Figura 1-26:</b> Ejemplo de la primera variante de fabricación formativa. ....	54
<b>Figura 1-27:</b> Otro ejemplo de la primera variante de la fabricación formativa.....	55
<b>Figura 1-28:</b> Ejemplo de la segunda variante de la fabricación formativa.....	55
<b>Figura 1-29:</b> Proceso de fabricación formativa por explosión.....	57
<b>Figura 1-30:</b> Ejemplo de formado por explosión.....	57
<b>Figura 1-31:</b> Primeras aplicaciones de robótica en obra. ....	59
<b>Figura 1-32:</b> Complementos acoplables a un brazo robótico. ....	60

<b>Figura 1-33:</b>	Algunos prototipos desarrollados en las investigaciones del ETHZ. ....	61
<b>Figura 1-34:</b>	Pabellones desarrollados en la Universidad de Stuttgart. ....	62
<b>Figura 1-35:</b>	Procesos constructivos tradicionales con fabricación robótica en obra y con arcilla. ....	62
<b>Figura 1-36:</b>	Fabricación robótica con mampostería en proyectos ejecutados. ....	63
<b>Figura 1-37:</b>	Fabricación robótica aplicada en procesos sustractivos y de corte. ....	64
<b>Figura 1-38:</b>	Seccionado y teselado. ....	66
<b>Figura 1-39:</b>	Plegado y conformado. ....	66
<b>Figura 1-40:</b>	Contorneado y Kerf-bending. ....	66
<b>Figura 1-41:</b>	Diagrama comparativo de procesos de diseño. ....	68
<b>Figura 1-42:</b>	Complejización de los flujos de información y de trabajo. ....	69
<b>Figura 2-1:</b>	Prototipos realizados como parte de investigaciones. ....	87
<b>Figura 2-2:</b>	Pabellones y prototipos realizados durante workshops y asignaturas. ...	88
<b>Figura 2-3:</b>	Pabellones y prototipos realizados durante workshops. ....	90
<b>Figura 2-4:</b>	“coBLOgó,” aplicación de diseño computacional en proyectos construidos. ....	91
<b>Figura 2-5:</b>	Diseño computacional y fabricación digital en proyectos de la región. ....	92
<b>Figura 2-6:</b>	Ejemplos de aplicación en espacios interiores y mobiliario. ....	92
<b>Figura 2-7:</b>	Otros ejemplos en espacios interiores y de apropiación tecnológica. ....	93
<b>Figura 2-8:</b>	Ejemplos de proyectos ejecutados por consultores y/o fabricantes. ....	95
<b>Figura 2-9:</b>	Aplicación de diseño computacional y fabricación digital en el Museo Soumaya. ....	96
<b>Figura 2-10:</b>	Procesos de fabricación digital en un proyecto fuera de la región. ....	97
<b>Figura 2-11:</b>	Otras aplicaciones en fachada y espacios interiores. ....	98
<b>Figura 3-1:</b>	Medios de producción artesanal para prefabricados de mampostería en Colombia. ....	105
<b>Figura 3-2:</b>	Obras ejecutadas con elementos prefabricados industrializados en Colombia. ....	106
<b>Figura 3-3:</b>	Algunos ejercicios fabricados a escala real. ....	110
<b>Figura 3-4:</b>	Proyectos con aplicaciones de fachada mediante fabricación digital. ....	112
<b>Figura 3-5:</b>	Proyecto ejecutado mediante técnicas de diseño computacional y fabricación digital por una consultora. ....	113
<b>Figura 3-6:</b>	Maquinaria cnc en procesos de línea de producción establecidos. ....	114
<b>Figura 4-1:</b>	Fabricación robótica de estructuras complejas con horquetas de madera. ....	133
<b>Figura 4-2:</b>	Ejemplo de dispositivos e instalaciones portátiles para fabricación digital. ....	134
<b>Figura 4-3:</b>	Ejemplos de materiales de base biológica. ....	136
<b>Figura 4-4:</b>	Prototipos de robots autónomos para construcción en sitio. ....	136

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Autores investigadores sobre primeros avances de la computación en el diseño. ....	21
<b>Tabla 2-1:</b> Instituciones académicas latinoamericanas con producción investigativa o servicios relacionados con la utilización y análisis o implementación de herramientas digitales en procesos de diseño y construcción. ....	79
<b>Tabla 3-1:</b> Laboratorios de fabricación en instituciones académicas o como iniciativas independientes en Colombia. ....	109





# Introducción

Es ampliamente conocida, la global y creciente disponibilidad tecnológica de los medios digitales en los procesos de diseño y construcción del proyecto arquitectónico. Ellos facilitan hoy crecientemente la exploración y proposición de nuevas formas de pensar y hacer arquitectura, tanto en su representación y diseño, como en su materialización. Esta disponibilidad facilitada, ha promovido la aparición de diversas aproximaciones que comienzan a transformar procesos tradicionales en sus campos, de cara a conceptos como el de solución integral de concepto a realización, digitalmente interconectados. Lo anterior es la síntesis de la formalización de procesos computacionales tanto de diseño como de construcción, que dan forma (in-forman) al proyecto, mediante una densa red de variables entrelazada desde una etapa temprana del mismo, donde sus impactos, especialmente en el ámbito constructivo son preocupación de este documento.

Dentro del campo de la construcción, la prefabricación como un conjunto de procedimientos que facilitan y aceleran la concretización material de los proyectos, actualmente también tiene a su alcance instrumentos digitales cada vez más capaces y precisos. Estos instrumentos, que avanzan paulatinamente hacia su normalización dentro de la actividad constructora, posibilitan el desarrollo de formas y estructuras que anteriormente fueran consideradas complejas, como por ejemplo las llamadas geometrías de forma libre, cuya producción resultaría impráctica en términos de recursos físicos tradicionales o incluso de factibilidad económica.

Hoy, sin embargo, tales desarrollos demuestran alcances en cubrimiento de expectativas que superan resultados tradicionales, que atendían hasta hace poco más de una década, a sistemas de variables lineales y que proponen soluciones en la intersección o incluso yuxtaposición entre necesidades y materialidad. Ha sido precisamente, en la necesidad de resolver analíticamente lo constructivo, es decir, en la *constructibilidad* de las propuestas arquitectónicas contemporáneas que hacen un redescubrimiento de las geometrías complejas, que las herramientas digitales que asisten los procesos de

*Diseño, Ingeniería y Manufactura (CAD, Computer Assisted Design; CAE, Computer Assisted Engineering y CAM, Computer Assisted Manufacturing, por sus siglas en inglés)* han acercado, mediante nuevos flujos de información, al arquitecto diseñador a los procesos de fabricación y construcción (Kolarevic, 2003).

Este acercamiento contribuye a cerrar de manera progresiva, la brecha tradicional entre representación y construcción (Iwamoto, 2009), que consiste en una pérdida de información a través de la comunicación de las ideas -el dibujo- y su traducción en objeto material -el edificio-. Este conflicto tiene sus orígenes en la disolución de la figura del “maestro constructor”, dominante hasta el medioevo y la escisión entre el trabajo manual “inferior” del artesano y el trabajo intelectual “superior” del arquitecto, que fuera planteada durante el Renacimiento por León Battista Alberti (Kolarevic, 2003). Según Stevens y Nelson (2011), “este cambio impactó una parte esencial del proceso del arquitecto al degradar la relación simbiótica entre mente y mano y limitó las consecuencias inmediatas en el diseño que solo el hacer puede proveer”.

Como fruto del nuevo acercamiento del arquitecto al proceso constructivo, nuevos flujos de trabajo empiezan a aparecer, en donde, por ejemplo, para ejecutar un proyecto determinado podría llegar a no requerirse de documentación técnica en la forma tradicional de planos constructivos, más que como un conjunto de instrucciones de ensamble de piezas para un determinado equipo de trabajo, cuyo origen y soporte es un modelo tridimensional conectado a maquinaria especializada para su manufactura. Pero además con la particularidad de ser repetible y adaptable dentro de los mismos o diferentes requerimientos de tiempo o espacio.

Las inquietudes que surgen de esta aproximación, muestran que el grado de novedad que introduce la tecnología digital, retroalimentada por el saber creativo y propositivo de los modos de hacer de nivel global, tanto en la producción arquitectónica como en la actividad constructora, representan grandes oportunidades de exploración investigativa. Por lo tanto, en lo constructivo con ventajas mayores a aquellas heredadas de los avances de la modernidad, como la producción masiva en serie y en lo creativo por enriquecimiento de los procesos con conceptualizaciones y escalas mayores hoy, que las determinadas por principios simplificados de forma y luz.

Surge allí el interés de documentar el alcance tecnológico mencionado y reconocer su importancia tomada y pendiente, en un contexto que pretende iniciar un abordaje, especialmente teniendo en cuenta que la difusión y el acceso a estos medios, ha ido creciendo durante los años recientes a nivel global, donde es notorio que su velocidad de implementación es aún muy baja en contextos como el latinoamericano y particularmente en el colombiano, en el cual se quiere desembocar.

Teniendo en cuenta dimensiones como la disponibilidad tecnológica, el concepto de solución digital integral, la génesis informada del proyecto como apoyo a procesos de toma de decisiones, la pre-fabricación asistida y acelerada en normalización, la documentación digital y adaptable, la democratización vía web del know-how desde diversas latitudes y el cambio general del paradigma de producción industrial y su introducción a la construcción, es en últimas, lo que este trabajo busca analizar en contexto.

La finalidad de este trabajo tiene tres facetas. En primer lugar, la histórica, al intentar establecer cómo ha venido sucediendo el proceso de implementación de estas tecnologías dentro de la industria de la construcción. En segundo lugar, la estratégica, dado que se quiere indagar el impacto y nivel de inserción de diversos agentes relacionados con el tema dentro del contexto local, clasificándolos en tres grandes grupos según su naturaleza: academia, diseño e industria. Y por último, la de posicionamiento, al determinar una idea clara sobre cuáles pueden ser los factores específicos que están promoviendo o impidiendo una implementación de estas tecnologías dentro del contexto local en la actualidad, con la importancia final de aportar en vislumbrar qué posibles escenarios de aplicación específica pueden tener a mediano plazo.



# 1. Conceptos Básicos y Antecedentes

Al tenor de lo anteriormente expuesto, a continuación, se describirán de manera sinóptica los conceptos fundamentales y los aspectos más relevantes del proceso histórico de evolución de la tecnología digital, en el camino hacia su adopción y aplicación en el diseño arquitectónico. Esto permitirá comprender cómo las herramientas digitales han tenido impacto a su vez en la construcción.

## 1.1 Diseño Asistido por Computador (CAD), modelado paramétrico y diseño computacional

En la medida en que la capacidad de procesamiento de la información de los computadores ha ido evolucionando y con su continua inserción en la tecnología principalmente con una de sus mejores características, la eliminación de la redundancia de esfuerzos en todo campo, ha sido posible para diferentes artes y técnicas, como la arquitectura y la construcción, el adoptar sus avances.

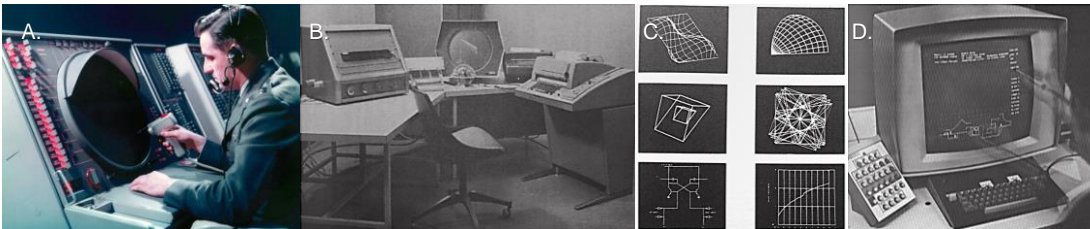
Originalmente estos avances surgieron en campos como la defensa militar con posterioridad a la segunda guerra mundial, como por ejemplo la primera red de computadores usada para coordinar operaciones de radar, el *SAGE (Semi-Automated Ground Environment)*, que se puede observar en la figura 1-1, desarrollado en una serie de esfuerzos investigativos conjuntos entre el ejército norteamericano (Fuerza Aérea) y la academia (Instituto Tecnológico de Massachusetts, en adelante MIT). De este modo se sentaron las bases de buena parte de la computación como se le conoce en la actualidad, a través de elementos como dispositivos de salida (pantallas), memorias artificiales, interfaces humano-máquina, computación gráfica y procesos de traducción de información (Dunn, 2012). Pero fue especialmente la capacidad de cómputo de la

información -capacidad que se usaría en su momento por ejemplo para el control de lanzamiento y trayectoria de misiles- lo que evolucionaría hasta convertirse en lo que hoy en día se conoce como computación personal.

Uno de los resultados más significativos de dichos esfuerzos investigativos entre ejército y academia, que también involucró a las industrias aeronáutica y de armamento, tuvo que ver con el desarrollo de sistemas que permitieran lograr la “optimización de procesos de diseño y producción de misiles, aviones y sus componentes”, pero que además dichos sistemas pudieran tener “aplicabilidad directa de las tecnologías desarrolladas en la industria estadounidense” (Cardoso, 2011). Fue por esa vía, como una investigación en ese contexto académico-militar, conocida como Proyecto de Diseño Asistido por Computador, permitiría al ingeniero Steven A. Coons (a quien se podría considerar uno de los padres de esta tecnología), lograr representaciones gráficas de segmentos de superficies curvas (que llamó *patches*), que durante el periodo de la segunda guerra mundial solo había podido desarrollar mediante técnicas matemáticas basadas en parámetros.

**Figura 1-1:** Primeras interfaces computacionales.

A. Operador usando la interface del sistema SAGE - B. Consola ESL. - C. Imágenes tomadas de la pantalla de la misma consola. - D. Sistema URBAN5, uno de los sistemas descritos en “La máquina de arquitectura” de Nicholas Negroponte.



Fuentes: A. (Dunn, 2012) - B, C y D. (Cardoso, 2011).

El mencionado proyecto de investigación -desarrollado entre 1959 y 1967- implicó una reconceptualización del término diseño, en un sentido mucho más amplio. Era un “proceso de resolución de problemas -el cual puede dividirse en ciclos de representación, análisis y materialización-” (Cardoso, 2011). Para ello, se llevó a cabo la formulación de un marco general para la “evolución” de un sistema de Diseño Asistido por Computador que permitiera formular los problemas de diseño mediante un lenguaje de entidades

discretas. Dicho marco debía tener aplicabilidad en diversos campos dentro de los que se incluyeron “geometría, materiales, termodinámica, aerodinámica e incluso estética”. Este proceso era el resultado de una interacción “simbiótica”, aunque asimétrica, entre hombre y máquina, en donde el hombre era entendido como amo en su papel exploratorio y creativo, a lo que denominó “momento creativo”, mientras la máquina era el esclavo, en su papel analítico y computacional, que por su parte se llamaría “momento mecánico” (Cardoso, 2011). Lo anterior explica que, en su concepción original, el Diseño Asistido por Computador (CAD, acrónimo de su nombre en inglés) tuvo alcances mucho mayores a los que se le reconocen hoy.

No obstante, quien visualizó el CAD como una herramienta para el diseño arquitectónico sería Nicholas Negroponte (estudiante de Coons), aunque dicha idea también sería apoyada por Coons. Paradójicamente, la visión de Negroponte propone la creación arquitectónica sin la intermediación del arquitecto, a quien consideraba innecesario. En su lugar se debía empoderar al usuario o habitante a través del computador y el CAD, en donde este último tendría fundamentalmente la misma importancia de quien lo usa para diseñar, contrario a la dualidad amo-esclavo propuesta por Coons.

El CAD alcanzó una implementación amplia y significativa en la arquitectura mucho más tarde, hasta la década de los ochenta, con la masificación de la computación personal, haciendo patente su impacto en procesos de representación del proyecto en la etapa de diseño, a través de diversas oficinas de arquitectura alrededor del mundo. Fue realmente desde esa época, que esta herramienta se extendió hasta alcanzar el grado de implementación al cual es empleada hoy en día, y que hace casi imposible en la actualidad, pensar en el desarrollo de proyectos de forma exclusivamente analógica.

Gracias a características como la independencia de elementos dentro del dibujo, mediante órdenes como “copiar”, “cortar” y “pegar” se agilizaron tareas repetitivas como añadir, reposicionar o remover elementos del diseño (Dunn, 2012). Con ello se obtuvieron dos enormes ventajas, opuestas por plazo o por medios: precisión y velocidad en el desarrollo de los diseños y su representación, aspectos difícilmente alcanzables simultáneamente en la práctica cotidiana del dibujo manual hasta ese entonces.

De la mano del computador, otro avance derivado de los desarrollos de Coons, que también fue adoptado en los procesos de diseño, fue el modelado en tres dimensiones. Con esta herramienta se facilitó y promovió la representación de la forma arquitectónica, anticipando incluso a las maquetas de taller. El software de modelado 3d, inicialmente funcionó bajo dos sistemas de representación gráfica, la *Geometría Constructiva Sólida* y la *Boundary Representation (BRep)*, no obstante, más adelante otros desarrollos más complejos y avanzados como las *NURBS* y las *mallas poligonales*, tuvieron lugar.

Las *NURBS*, acrónimo en inglés para *Non-Uniform Rational Basis Splines* o *Curvas de Base Racional No Uniforme*, son una representación geométrica de curvas y superficies onduladas de alta complejidad matemática. La palabra *splines* traducida como curvas, corresponde a una analogía con una pieza de madera o acero larga y flexible, curvada mediante vapor o fuerzas mecánicas, que se usaba desde la antigüedad, como plantilla para el trazado de secciones curvas en la construcción de cascos de barcos mediante una técnica conocida como *lofting*, como se puede ver en la figura 1-2 (Kolarevic, 2003). Para el siglo XVII, las splines para lofting empiezan a ser usadas para registrar curvas en planos constructivos a escala con fines contractuales y de representación. Siglos más tarde, serían empleadas en el diseño y construcción del fuselaje de aeronaves. Ya a principios del siglo XX y hasta la aparición del computador, la herramienta estándar para trazado de curvas en cualquier rama del diseño, fue la plantilla conocida como Curva francesa, desarrollada por el geómetra alemán Ludwig Burmester (Townsend, 2014).

**Figura 1-2:** Usos y registros de las curvaturas en el diseño.

A. Plano constructivo con las secciones transversales sobrepuestas de un barco - B. Tira de balsa deformada y asegurada mediante pesas ancladas llamadas “patos”, para el trazado del casco de un bote (centro). - C. Conjunto de “curvas francesas” matemáticamente ordenadas por Burmester alrededor del año 1900.



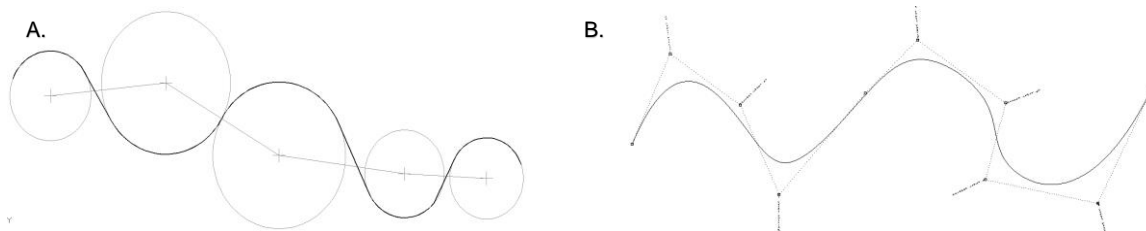
Fuente: (Townsend, 2014).



El método matemático de las curvas y superficies NURBS, que permitió un dominio superior de las geometrías complejas, respecto a lo que se podría hacer hasta ese momento (ver figura 1-3), fue desarrollado desde la industria automotriz por el ingeniero francés Paul de Faget de Casteljau en 1959 para la casa automotriz Citroën y en 1962 el ingeniero Pierre Bézier de la también automotriz Renault, llegaría a un resultado análogo con un método sustancialmente diferente, que posteriormente mejoraría para aplicarlo en la producción de superficies de la carrocería de los vehículos. En ambos casos, los métodos fueron concebidos como lenguajes geométricos comunes en respuesta a la falta de consistencia y posibilidad de error humano existente en los métodos manuales de diseño y construcción de los vehículos de dichas empresas. En esa época se partía de uno o varios modelos maestros a escala real en arcilla. Estos lenguajes también sirvieron para traducir esa información geométrica, en datos interpretables por máquinas de fabricación numéricamente controladas por computador<sup>1</sup>, tecnología que se describirá más adelante.

**Figura 1-3:** Tipos de curvas por medios computacionales.

A. Curva construida por aproximación a partir de la intersección de líneas rectas y arcos - B. Curva NURBS construida a partir de puntos de control, valores de peso (*weights*) y nudos (*knots*) cuyos valores y posiciones se influyen entre sí, afectando la curva resultante.



Fuente: Elaboración propia adaptado de Kolarevic (2003).

Las dos versiones del método NURBS en un principio fueron vistas con escepticismo, pero resultaron ser muy eficientes en términos de representar un alto grado de complejidad geométrica y matemática, a través de una mínima cantidad de información. Lo que, con seguridad, justifica su amplia popularidad en la actualidad dentro de casi cualquier programa de modelado 3d, al punto en que hoy en día todos los campos del diseño, desde el diseño de productos de consumo masivo, por ejemplo, automóviles o

---

<sup>1</sup> Las primeras fresadoras de control numérico computarizado (CNC) fueron desarrolladas por el Laboratorio de Sistemas Electrónicos del MIT durante los años cuarenta (Cardoso, 2011).

electrodomésticos hasta la tipografía, en los estándares PostScript y TrueType del software para publicación impresa, heredaron bastante de este método.

Un tercer método, es el de las mallas poligonales o *meshes*. Estas consisten en una red de elementos que, unidos en una estructura determinada, conforman una aproximación a la geometría del objeto a modelar, como se observa en la figura 1-4. En ellas se pueden ejecutar diversas operaciones geométricas, como por ejemplo de tipo booleano (adición, sustracción o intersección entre elementos) y su suavizado o simplificación (aumento o reducción iterativa en el número de subdivisiones o caras de una superficie para que tenga mayor o menor resolución respectivamente).

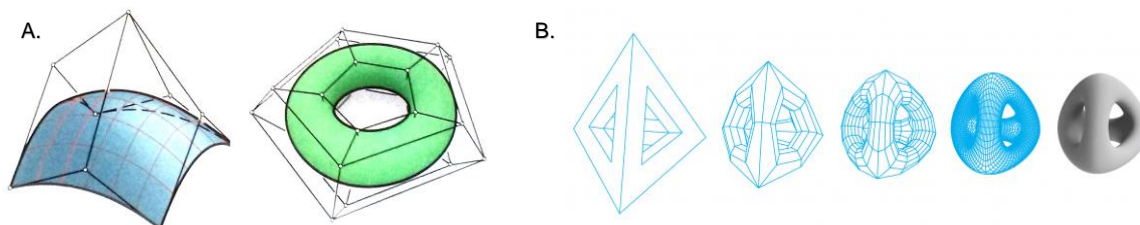
Su creación, más reciente que los métodos anteriores, tuvo lugar en la industria de la computación gráfica y supera las limitaciones topológicas de las NURBS<sup>2</sup>. Por lo tanto, su uso ha sido intensivo en el desarrollo de simulaciones físicas (dinámica de cuerpos rígidos, detección de colisiones o trazado de rayos), que han sido empleadas en la creación de efectos visuales como los comúnmente vistos hoy en día en cine, televisión, publicidad o animación digital. Así mismo, métodos de simulación en ingenierías y otros campos científicos, tales como el de *Análisis de Elementos Finitos* o la *Dinámica de Fluidos Computacional*, que se explicarán más adelante, trabajan a partir de este sistema.

---

<sup>2</sup> Las NURBS están limitadas por superficies que son topológicamente rectangulares, tales como planos distorsionados, cilindros, esferas y toroides, volúmenes producidos por superficies rectangulares curvadas en las cuales uno o más bordes están unidos para producir una forma cerrada (Townsend, 2014).

**Figura 1-4:** Superficies y métodos de subdivisión por medios computacionales.

A. Superficies de Bézier (cuadrilátero convexo) y B-Spline (toroide) con sus respectivos puntos de control, las cuales son derivadas de curvas NURBS, y son a su vez métodos especiales de subdivisión de superficies. - 2. Suavizado por subdivisión, la malla original (tetraedro) es subdividida progresivamente hasta lograr una forma suave, aún si la topología es compleja.



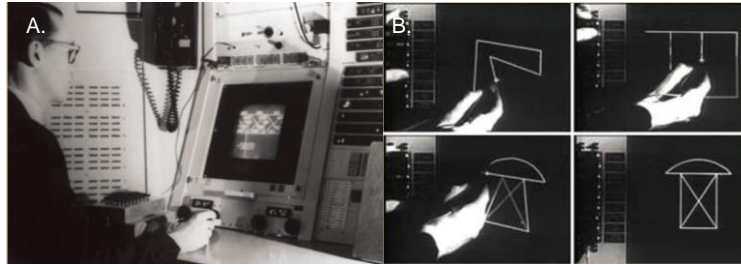
Fuentes: A. (Pottmann & Bentley, 2007). - B. (Townsend, 2011).

El diseño arquitectónico en particular, se ha visto beneficiado directamente por los avances descritos hasta ahora y sus variantes -CAD y modelado 3d por sólidos, NURBS y mallas- al estar integrados total o parcialmente en la mayoría, sino en todos los programas de diseño empleados en la actualidad. Lo anterior ha facilitado no solamente los procesos de representación sino, además, la exploración y proposición de nuevos lenguajes formales que implican complejidades constructivas a partir de la manipulación de geometrías no euclidianas (formas curvilíneas y superficies onduladas). Con ello se ha alcanzado un sofisticado nivel de desarrollo de la forma arquitectónica, que ha brindado a los diseñadores mayor expresividad, liberándolos de las limitaciones tradicionales del espacio cartesiano.

Por otra parte, una capacidad importante que empiezan a incluir algunos programas CAD es el **modelado paramétrico**, cuyos orígenes se remontan a los mismos desarrollos matemáticos de Coons implementados en la computación. Uno de los ejemplos más tempranos del modelado paramétrico, fue el programa Sketchpad de Ivan Sutherland, que se puede observar en la figura 1-5, (otro estudiante de Coons), quien ha creado, de paso, la primera interfaz gráfica interactiva de la historia, cuya enorme influencia en la computación interactiva es ampliamente reconocida (Cardoso, 2011). Sin embargo, el modelado paramétrico como capacidad para modelado tridimensional no volvería a aparecer sino hasta 1988 en Pro/ENGINEER, un programa CAD para ingeniería mecánica. La adopción y uso de esta capacidad dentro del software para arquitectura es aún más reciente (Davis, 2013).

**Figura 1-5:** *Sketchpad*, primera interfaz gráfica interactiva.

A. Ivan Sutherland demostrando su uso. B. Imágenes de pantalla en el proceso, la interfaz paramétrica funcionaba con un lápiz de luz directamente sobre la pantalla para realizar cambios en el diseño.



Fuente: (Dunn, 2012).

Teniendo en cuenta que, de acuerdo con Davis no existe un consenso sobre la definición acerca del concepto de modelado paramétrico en el contexto de la arquitectura, ni tampoco existe claridad sobre el origen del término en dicho contexto, a continuación, se ofrecerá una definición propia. El modelado paramétrico se trata de un método para la configuración de sistemas de relaciones asociativas entre variables -parámetros- de entidades geométricas. Dichas variables pueden ser abstractas o estar vinculadas a propiedades de características específicas de diseño para la exploración de alternativas para la resolución de un problema determinado.

En otras palabras, a través de programación<sup>3</sup>, en el modelado paramétrico una geometría (sólidos y/o superficies) es configurada estableciendo relaciones asociativas de parámetros o restricciones, mediante ciertas entradas de datos, lo que se puede traducir en la práctica, en modelos tridimensionales que pueden variar las características así definidas con relativa flexibilidad, con el fin de explorar múltiples variaciones de un mismo diseño. Por ejemplo, propiedades de la propia geometría tales como longitud, área, coordenadas de vértices, aristas, puntos de control, valores numéricos o también expresados como fórmulas, por ejemplo: la altura de un cono = radio de su base / 2.

---

<sup>3</sup> En la actualidad, los programas CAD con capacidad para modelar paramétricamente, ofrecen dos alternativas de interfaces que definen tres modalidades: Textual, también conocida como *scripting* (mediante texto en una Interfaz de Programación de una Aplicación (API por sus siglas en inglés), con base en la sintaxis y métodos de un lenguaje de programación específicos), Gráfica (mediante una interfaz de esquemas gráficos diseñada para tal fin) y Mixta (una combinación de las dos anteriores, comúnmente la primera como una parte de la segunda).

---

Como ha sido mostrado, esta nueva capacidad de integrar casi cualquier modificación a los parámetros variables definidos para un elemento, establecidos mediante estas relaciones interconectadas, se propagará de manera dinámica a través de la forma resultante. La concatenación de pasos establecida en estas relaciones, configuran un algoritmo, que es un “conjunto ordenado y finito de operaciones, que permite hallar la solución de un problema.”<sup>4</sup> Es importante aclarar que la creación de un algoritmo, no implica el uso del computador, pero su uso si facilita el proceso, al multiplicar la cantidad de probabilidades con éxito sobre un criterio definido y acelerar su visualización.

Esa lógica procesal, ha permitido con relativa facilidad y alta precisión a diseñadores, arquitectos e inclusive urbanistas, interconectar diversas variables de un problema de diseño y además representar y cuantificar formas de una alta complejidad geométrica, que en algunos casos mediante técnicas tradicionales de representación sería demasiado dispendioso o imposible de conseguir, pero que inclusive han podido llegar a exigir su recurso técnico a puntos antes no sospechados.

Mediante su uso es posible vincular múltiples condicionantes de diversa índole y escala en un proyecto determinado. Dentro de los más comúnmente estudiados y aplicados se encuentran los de orden espacial, estructural, constructivo, ambiental, programático, normativo, financiero, material e incluso combinaciones entre estos, en algunos casos. Esto facilita la generación y por ende la exploración de una multiplicidad de variaciones. Lo cual resulta por definición, opuesto al tradicional modelado 3d directo –hoy de uso convencional en la visualización gráfica- en donde casi cualquier modificación de la geometría implica un reproceso muchas veces dispendioso e impráctico en cualquier proceso de diseño.

A raíz de lo anterior, una nueva mentalidad por parte del arquitecto ha emergido, complementando su repertorio creativo con el uso de este recurso. Al considerar el computador ya no únicamente como una herramienta que expedita y facilita la representación virtual (gráfica) de un proyecto, sino que además es un dispositivo

---

<sup>4</sup> Definición de la Real Academia Española (ver <http://dle.rae.es/?id=1nmLTsh>)

avanzado de manipulación y cálculo complejo de información que logra ampliar el abanico de posibilidades del diseño.

Así, las capacidades creativas del diseñador se extienden, al brindarle información cuantitativa más completa y precisa para tomar decisiones durante el proceso de diseño, y de paso, de lógica constructiva de acuerdo al caso. Aquí se hacen evidentes las diferencias entre los conceptos *Computation* y *Computerization* expuestos por el arquitecto Kostas Terzidis (2006). *Computerization* se refiere al uso del computador en tanto es una herramienta que permite la digitalización, automatización, mecanización, conversión y almacenamiento de la información, en entidades o procesos predeterminados. *Computation* por el contrario, es la extensión del intelecto humano mediante el uso del computador, porque implica la aplicación continua de la racionalización, el razonamiento, la lógica, la deducción, la inducción, el algoritmo, la extrapolación, la exploración y la estimación, aplicados a la resolución de problemas. Para Terzidis el modo predominante de uso del computador en la arquitectura, ha sido el de *Computerization*, lo que implica que los arquitectos aún no están explotando todo el potencial del computador.

En años recientes, sin embargo, a partir de la popularización de interfaces gráficas para modelado paramétrico en algunos programas CAD, se ha divulgado una variedad de términos que hacen referencia a esas mismas herramientas y sus métodos, tales como diseño digital, diseño algorítmico o *algotectura* (Terzidis, 2006), diseño generativo y quizá el más ampliamente empleado en la actualidad, diseño paramétrico.

Para comprender mejor el concepto de lo paramétrico en el diseño, habría que entender primero los orígenes del propio término "paramétrico". De acuerdo con Davis, se obtiene que "el término paramétrico se origina en las matemáticas, al menos desde 1830 (...) los matemáticos y científicos han usado el término en relación a varias representaciones genéricas". Sin embargo, en el terreno de la arquitectura, "a medida que los arquitectos han adoptado el modelado paramétrico como medio de diseño, la definición de paramétrico se ha vuelto poco clara. Ahora cuando los arquitectos usan el término paramétrico, puede significar todo en el diseño, o solo las cosas que cambian, o las herramientas, o un diseño en el estilo del parametricismo. Esta discrepancia existe

incluso a nivel individual, con muchos autores prominentes que definen paramétrico de forma diferente a través de sus obras” (2013).

Algunos autores y arquitectos tanto en la academia como en la práctica profesional, han optado por denominar este mismo fenómeno como **diseño computacional**, entendiéndolo como “la utilización de una máquina informacional, el computador, en el proceso creativo del diseño” (Vardouli, 2012). Sin embargo, es aún un campo específico del conocimiento, en el que no se ha determinado cuál de las dos áreas, el diseño o la ciencia computacional, se impone sobre la otra. Lo que, como problemática conceptual entre disciplinas y prácticas en relación a su objeto de conocimiento, afecta también, por encontrarse en ruta de aproximación a los temas constructivos, transversalizados por el devenir tecnológico, alrededor de las edificaciones y sus autores materiales.

A lo largo de este trabajo, se empleará el término diseño computacional para referirse al fenómeno que aquí se estudia, puesto que indica una relación directa con el uso del computador como instrumento dentro del proceso de diseño, pero también una relación indirecta en el de construcción -a través de la fabricación digital, concepto que se explicará más adelante- más no se convierte en razón de ser de ninguno de los dos. Un segundo argumento para descartar el uso del término diseño paramétrico en este contexto es, que se sobreentiende que la geometría, independientemente de su grado de complejidad, puede ser modelada y modificada mediante parámetros (matemáticos o de otra índole) independientemente del uso del computador.

Con base en todo lo descrito anteriormente, se puede resumir que el uso del computador en la arquitectura, en un principio mediante la utilización de programas CAD, modelado 3d y más recientemente de modelado paramétrico, ha tenido un alto impacto en la disciplina gracias a la posibilidad de, en primera instancia, poder representar aquello que por medios convencionales fuera muy difícil o imposible. Pero de mayor interés, por la posibilidad de explotar la capacidad de procesamiento de información de los medios digitales, que ha derivado en la generación de nuevas lógicas de proyecto.

Todo ello ha implicado para la construcción, una progresiva desaparición de antiguos dilemas entre lo representable y lo construible, como señalara William J. Mitchell, puesto que es relativo a la tecnología con que se cuenta, que los “arquitectos dibujaban lo que

podían construir y construían lo que podían dibujar” (Kolarevic, 2003). No obstante, en sus inicios tales lógicas de producción no surgieron exclusivamente del uso de los medios digitales, como se verá a continuación.

## **1.2 Antecedentes analógicos y digitales del modelado paramétrico**

En este punto se presentará un recorrido a través de la evolución del diseño computacional en la arquitectura y sus implicaciones en la construcción, desde sus orígenes probables hasta la actualidad. Algunos proyectos arquitectónicos que se describirán, dan cuenta de cómo durante ese proceso evolutivo, tuvo origen un tipo de pensamiento para la generación de la forma arquitectónica y estructural basado en información, contrario a otro tipo de pensamiento en el diseño, orientado predominantemente por criterios estéticos. En otras palabras, un pensamiento computacional en el diseño se produjo a partir de la comprensión e instrumentalización de sistemas de variables subyacentes en fenómenos físicos, los cuales serían comprobados por medios y métodos analógicos y cuyos resultados han sido aplicables a lógicas constructivas, proceso que posteriormente se vería facilitado y mejorado a través de la utilización del computador.

Una de las aproximaciones más tempranas sobre la instrumentalización de lo paramétrico en la arquitectura y la construcción, previa al desarrollo de la tecnología digital, tiene lugar en las experimentaciones con arcos catenarios de Antoni Gaudí. Al contar con todos los elementos de una ecuación paramétrica<sup>5</sup>, su modelo de cadenas colgantes que se observa en la figura 1-6, es un ejemplo patente de este concepto. Aun siendo un modelo analógico, es decir, un prototipo o dispositivo empleado para la demostración de un concepto, principio o mecanismo, con este se podía generar la forma

---

<sup>5</sup> Grupo de ecuaciones que expresan un conjunto de funciones explícitas de un número de variables independientes conocidas como “parámetros”. Las ecuaciones paramétricas proveen una forma conveniente para representar curvas y superficies.

Fuente: <http://mathworld.wolfram.com/ParametricEquations.html>



de los arcos mediante la gravedad que actuaba en las cadenas, aplicando el principio de Hooke<sup>6</sup>.

Un **conjunto de parámetros** -longitud de las cadenas, puntos de anclaje, posición y peso de los sacos colgantes- al sufrir variaciones, produce cambios en todo el conjunto - posiciones de los vértices en las cadenas- (Davis, 2013). Mediante la aplicación de una función específica, en este caso las leyes de movimiento de Newton, el principio de Hooke explica el funcionamiento estructural de esta geometría a compresión. La aplicación de dicho experimento, se evidencia en la estructura de la capilla de la Colonia Güell (Davis, 2013).

**Figura 1-6:** Sistema para derivación de arcos catenarios.

A. Modelo de sacos de perdigones y cadenas. B. Entrada a la capilla de la colonia Güell.



Fuente: A. Elaboración propia B. [www.gaudicoloniaguell.org](http://www.gaudicoloniaguell.org)

Décadas más tarde, el arquitecto e ingeniero estructural Frei Otto, también empleó modelos físicos que le permitieron experimentar con la forma y el material, como sistemas paramétricos en el diseño de varias de sus obras. Sus exploraciones casi siempre partieron de la observación de fenómenos físicos o biológicos, aproximación a la que denominó *form-finding*<sup>7</sup>. Dentro de los materiales que empleó Otto, se encuentran

---

<sup>6</sup> Expresado originalmente como: “así como cuelga la línea flexible, así, pero invertido se sostendrá el arco rígido”.

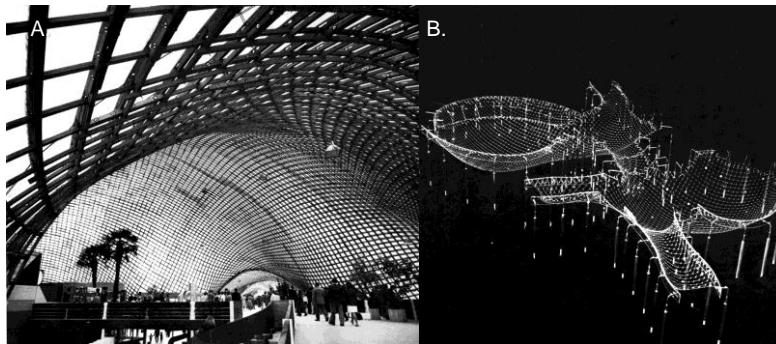
<sup>7</sup> A falta de una traducción al español para este término, se traducirá como “hallar la forma”. Este concepto como enfoque metodológico de diseño arquitectónico donde la forma es resultado de un proceso, resulta opuesto a otro enfoque tradicional y arraigado llamado “form-making” (hacer la forma), en donde el diseñador impone una forma o composición de formas de manera intuitiva pero donde otros aspectos del proyecto (programa, estructura, etc.) pueden resultar supeditados a esta.

cuerdas, alambre, hilos de lana sumergidos en líquidos, películas de solución jabonosa (burbujas), entre otros.

Dentro de sus obras, uno de los ejemplos más destacados al respecto es el Mannheim Multihalle, que se puede observar en la figura 1-7. Un edificio pensado inicialmente como un pabellón temporal por dos años (con una vida útil estimada de 20 años) para una feria de jardinería, pero que posteriormente ha servido para otros usos y actualmente sigue en pie. En este caso al igual que en el proyecto de Gaudí, el principio estudiado y empleado fue el mismo. Sin embargo, aquí, la tipología estructural de cáscara reticulada o gridshell, lo lleva a un nivel de complejidad mayor con el fin de conseguir una gran altura (20 m) y amplias luces (hasta 60 m) para su tipo.

**Figura 1-7:** Proceso de *form-finding* en la obra de Frei Otto.

A. Mannheim Multihalle, Alemania, 1975, Vista desde el interior. – B. Fotografía del modelo físico invertido en malla de alambre con sus soportes de latón.



Fuente: (SMD Arquitectes, 2009).

El comportamiento estructural de la superficie de doble curvatura, fue simulado elaborando un modelo físico a modo de cadenas suspendidas. Una malla de alambre suspendida de un marco de latón como elemento de borde, a escala 1:500 respecto al original, representaba los miembros de madera con que sería construida la estructura real. Del mismo modo, una superficie de láminas de acrílico modelaba a la membrana de recubrimiento de PVC y tejido de poliéster.

Dada la escala y la gran cantidad de nodos del diseño original, cada filamento de alambre del modelo representaba tres miembros de madera de la estructura real. Por la naturaleza del material empleado y la manera como se construyó el modelo, los nodos

tendrían libertad de desplazamiento angular. Esto en principio, le permitiría a la estructura encontrar el equilibrio bajo su carga propia al ser invertida, además de permitir predecir el comportamiento que tendría todo el conjunto.

Adicionalmente, este modelo permitió definir las longitudes de los miembros y posiciones de los nodos en la estructura real, ya que mediante la fotogrametría<sup>8</sup>, una técnica de geodesia<sup>9</sup> aplicada, esta información pudo ser escalada y reconstruida a tamaño real. Sin embargo, para lograr un proceso de form-finding más preciso, mediante la técnica mencionada y con la ayuda del computador, se empleó un método de cálculo para esta clase de estructuras, conocido como densidad de fuerza, con el fin de corregir posibles errores que hubieran podido surgir durante la elaboración del modelo físico (Happold y Liddell, 1976).

Otro ejemplo de enfoque sobre la parametrización aún sin el uso del computador, con el fin de derivar una forma arquitectónica, se remonta a los años sesenta en Italia. El arquitecto Luigi Moretti y el matemático Bruno de Finetti emplearon un método de diseño paramétrico para un estadio de uso múltiple (fútbol, tenis y natación), en donde se **establecieron relaciones geométricas muy rigurosas para optimizar las líneas de visibilidad desde las tribunas, a partir de diecinueve parámetros diferentes que incluían desde los ángulos visuales hasta el costo del concreto** (Davis, 2013).

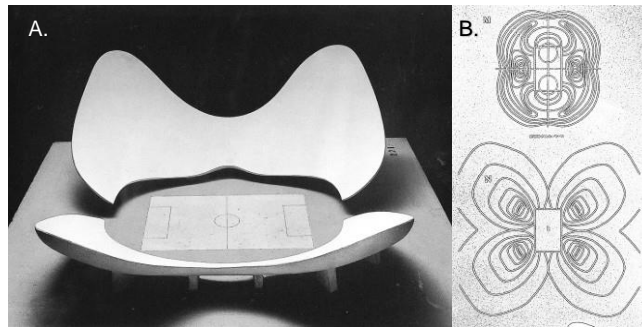
---

<sup>8</sup> Procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas (RAE).

<sup>9</sup> Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre o de gran parte de él, y construir los mapas correspondientes (RAE).

**Figura 1-8:** Parametrización involucrando factores adicionales a los constructivos.

A. Maqueta. B. Planos esquemáticos de las versiones M y N del estadio de Moretti, donde se muestran las curvas de “equideseabilidad”.

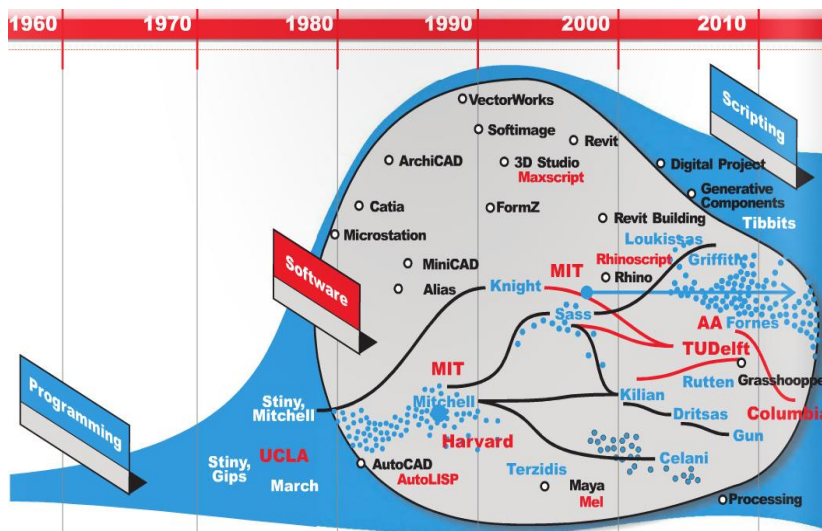


Fuente: (Davis, 2013).

Como se ha podido observar hasta el momento, las décadas del sesenta y setenta fueron productivas en la exploración basada en la instrumentalización de la información, expresada en variables paramétricas, dentro de la búsqueda de soluciones para los problemas de diseño, sin un mayor apoyo en herramientas digitales. No obstante, desde los años cincuenta, una variedad de investigaciones, que inclusive llegarían a tocar temas de la cibernética tan complejos y avanzados aún hoy, como la inteligencia artificial, fueron llevadas a cabo entorno al uso del computador en los procesos de diseño arquitectónico. Esto produjo una diversidad de avances, algunos de los cuales ya se han mencionado, así como otros que se pueden observar en las figuras 1-9, 1-10 y en la Tabla 1-1.

**Figura 1-9:** Histórico comparativo del software interactivo y la programación.

Esta línea de tiempo muestra la evolución desde la aparición de la programación y de paquetes comerciales de software (en negro) hasta el scripting, desde un nivel experimental en el diseño arquitectónico, a través de algunos de los pioneros (en azul y blanco) en diferentes escuelas de arquitectura (en rojo) que investigaron metodologías digitales.



Fuente: (Herrera, 2010).

**Tabla 1-1:** Autores investigadores sobre primeros avances de la computación en el diseño.

Autor	Año	Publicación	Aporte
Coons, S.	1963	An Outline of the Requirements for a Computer-aided Design System. En AFIPS Conference Proceeding: 1963 Spring Joint Computer Conference, 299-304. Londres: Cleaver-Hume Press.	Diseño Asistido por Computador
Bézier, P.	1962	Böhm, W., Farin, G. & Kahmann, J. (1984). A Survey of Curve and Surface Methods in CAGD. Computer Aided Geometric Design 1, 1 1-60.	Curvas y Superficies NURBS
De Casteljaou, P.	1959	Courbes à pôles, INPI	
	1963	Courbes et Surfaces à Pôles (Reporte Técnico) p.45. Paris: Citroën.	
Neumann, J.	1951	General and Logical Theory of Automata. En L. Jeffress (Ed.) Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium, 1-41.	Geometrías autoreplicantes y autómatas celulares

**Tabla 1-1** (Continuación).

Cross, N.	1977	The Automated Architect. London: Pion.	Diseño arquitectónico automatizado
Whitehead, B. y M. Z. Elders	1964	An approach to the Optimum Layout of Single Story Buildings. Architects Journal 139, 25, 1373-1380.	
Mitchell, W.	1977	Computer-Aided Architectural Design. New York: Petrocelli/Charter.	
Frazer, J.	1995 <sup>1</sup>	An evolutionary Architecture. London: Architectural Association.	Diseño mediante algoritmos evolutivos
Stiny, G. y Gips, J.	1971	Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. En Freiman C.V., Griffith, J. Rosenfeld, J.L. (Eds.), Proceedings of IFIP Congress 1971, 125–135. Amsterdam: North Holland Publishing.	Gramática de formas

<sup>1</sup> Proyectos de investigación desde 1966, se recopilan en publicación de 1995.

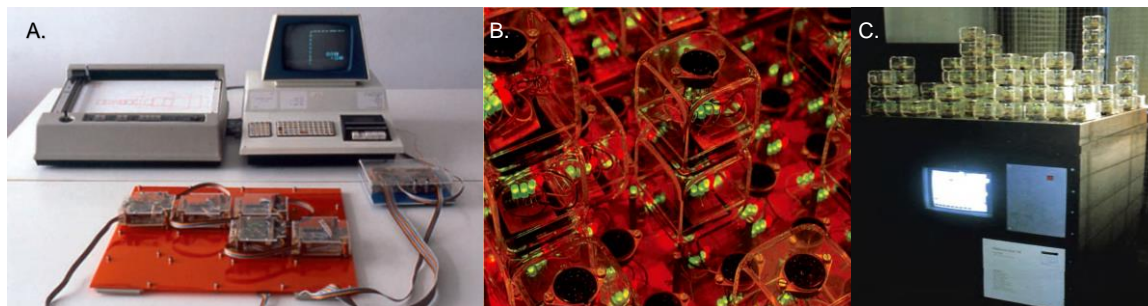
Fuente: Elaboración propia adaptado de Davis, 2013.

Desafortunadamente dado que para aquel entonces la computación era algo que ocurría aún en laboratorios de gobiernos, universidades o grandes corporaciones y no el fenómeno masivo de usos, alcances y objetivos diversos de la actualidad, la imposibilidad por costos para adquirir un computador en esa época, significó que los avances instrumentales y metodológicos logrados en tales investigaciones, no llegaron a ser aprovechados del todo como herramientas para el diseño arquitectónico (Davis, 2013).

Sin embargo, con el advenimiento de la computación personal en los años ochenta y el CAD como una herramienta de uso masivo entre arquitectos –aún con mayor fuerza en los noventa– los avances ya mencionados, incluyendo al modelado paramétrico, seguirían siendo investigados en entornos académicos, pero aún descartados en usos prácticos.

**Figura 1-10:** Prototipos de avances computacionales aplicados al diseño.

A. “Generator Interface”, modelo de inteligencia artificial que se adaptaba a su propio ambiente, desarrollado por John y Julia Frazer con Cedric Price en 1976. B. “Universal Constructor”, modelo funcional de un sistema de auto-organización en un ambiente interactivo desarrollado como proyecto de investigación por el arquitecto John Frazer en 1990.



Fuente: A- (Dunn, 2012) – B. (Frazer, 1995).

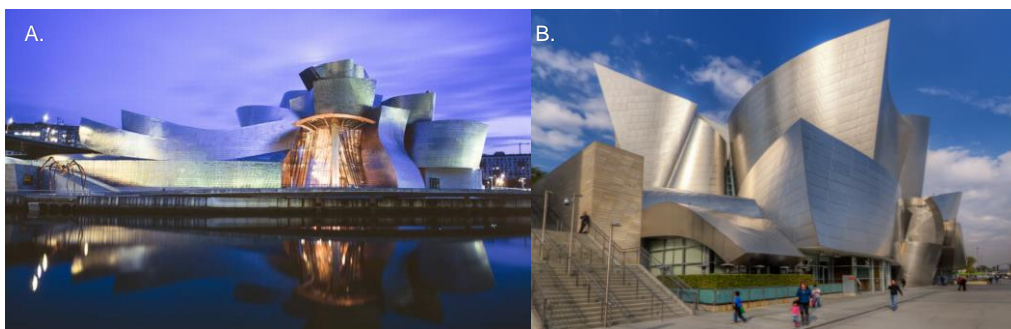
La posibilidad de modelar paramétricamente hasta ese entonces, prácticamente solo se veía en programas que ya eran convencionales en la ingeniería –mecánica, principalmente– tales como *Pro/ENGINEER*, el primer modelador paramétrico comercial o *CATIA* (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application), programa ampliamente empleado en la industria aeronáutica. Sin embargo, este último, se convertiría en la piedra angular que le permitiría al arquitecto Frank Gehry, resolver de manera eficiente y racional, la materialización de sus ideas formal y constructivamente complejas, que sin embargo resultan de procesos de imposición de la forma (*form-making*) como principio rector del diseño. Los ejemplos más destacados de su obra en este respecto son los proyectos, museo “El Pez”, museo Guggenheim y el Disney Concert Hall, que se observan en la figura 1-11. Gracias a esto, dichos proyectos se consolidaron como hitos en el uso de geometrías complejas digitalmente asistidas en su representación y el flujo de trabajo para su manufactura y construcción.

Como resultado de esa implementación y paralelamente al desarrollo de estos proyectos, Gehry crea una compañía de software para arquitectura, que, partiendo de la base de lo conseguido con *CATIA*, apunta a resolver problemas específicos de diseño y construcción de geometrías complejas similares a las que él mismo ha producido en sus proyectos, en su caso, a partir de maquetas físicas. En donde un ejemplo de aplicación, fue la racionalización de superficies de doble curvatura para el revestimiento de fachadas, donde los objetivos son la reducción de la cantidad total de piezas, del número

de piezas de forma única y del número de piezas de doble curvatura. Es así, como en el año 2004 presenta en el mercado el programa *Digital Project*. No obstante, aun cuando ya era posible con herramientas como esa, manipular formas complejas e innovadoras, para ese entonces todavía la gran mayoría de arquitectos empleaban el computador, el CAD y el 3D solo en procesos de dibujo, representación y coordinación técnica de forma desarticulada.

**Figura 1-11:** Obras de Frank Gehry.

A. Museo Guggenheim en Bilbao, España construido entre 1993 y 1997. B. Walt Disney Concert Hall en Los Ángeles, California, Estados Unidos, construido entre 1992 y 2003. En ambos casos se racionalizó la geometría de las superficies para la construcción tanto de la estructura como del revestimiento.



Fuente: A. [Guggenheim-bilbao.es](http://Guggenheim-bilbao.es). B. [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

Por otra parte, desde mediados de la década de los 90, nuevos programas como *ArchiCAD* y *Revit* hacen su aparición en el mercado con un elemento diferenciador respecto a los ya comunes programas CAD. Así por ejemplo *Revit*, creado por la Revit Technology Corporation fundada por antiguos socios de la empresa que creó *Pro/ENGINEER* y posteriormente adquirido por Autodesk, creadora de *AutoCAD*, prometía ser el primer modelador paramétrico de edificios pensado para arquitectos.

Años y versiones más adelante, *Revit* es reorientado a facilitar el trabajo colaborativo bajo la novedosa metodología del *Modelado de Información de la Construcción* o *Building Information Modelling* (en adelante BIM, por sus siglas en inglés), cuya implementación hoy en día va en aumento. Actualmente este tipo de software y esa metodología de trabajo, están desplazando paulatinamente al CAD en el nicho de mercado para el cual está pensado, empresas de arquitectura, ingeniería y construcción (gremio identificado como AEC por sus nombres en inglés). Esto ocurre gracias a que el software para BIM,



surge como una respuesta a las necesidades de coordinación y comunicación entre estas disciplinas que ningún software CAD, ni de modelado 3D habían logrado suplir hasta ahora en un flujo de trabajo, hasta cierto punto, unificado.

La metodología BIM propone una visión multidimensional e interdisciplinaria para el desarrollo del proyecto arquitectónico, desde su concepción hasta al fin de su ciclo de vida. En ella se reúnen de forma sincrónica a modo de base de datos paramétrica y gráfica, la documentación constructiva (2D), el modelado tridimensional, visualización y cuantificación de materiales (3D), las fases de construcción (4D), los costos (5D) y la administración de la edificación, esto es, su mantenimiento y operación o *facility management* (6D). Con base en esto, nuevos flujos de trabajo interdisciplinario y colaborativo se están generando, los cuales han resultado en ritmos de producción cada vez más veloces y eficientes.

Sin embargo, la concepción integral de esta metodología, no es el resultado de la creación de programas como *Revit* o *ArchiCAD*. Se remonta más bien a la creación del *Building Description System* de Charles Eastman en los años setenta. Este sistema consistía en una base de datos relacional que descomponía al edificio en sus partes constituyentes de forma taxonómica, las cuales podían ser agregadas desde una librería y proporcionaban, además, atributos propios tales como materiales o proveedores. El siguiente proyecto de este arquitecto y programador que se llamó *GLIDE* (Graphical Language for Interactive Design), ya empezaba a mostrar las características fundamentales de lo que hoy son los actuales programas para BIM (Bergin, 2011).

Si bien el concepto de lo paramétrico es evidente en los programas para BIM, estos no lo hacen de la misma forma que los programas CAD o 3d de la actualidad. Programas como *Revit* o *ArchiCAD*, apuntan al uso de información en parámetros muchas veces preestablecidos, que definen y/o modifican elementos constructivos a partir de fórmulas paramétricas, más no permiten establecer o modificar libremente relaciones entre tales elementos y sus propiedades, ni de manera asociativa ni algorítmica.

Una primera conclusión a decantar hasta este punto, es que la capacidad para modelar paramétrica y algorítmicamente no es simplemente parte de experimentaciones aisladas ni tampoco una novedad introducida recientemente en el software en general. Sin

embargo, gracias a la lógica abierta que cada programa ofrece para su propia manipulación, extendiéndolo o adicionándole capacidades específicas que no posee de facto, permite al usuario la creación de algoritmos personalizados. En ese sentido ya no se hablaría de estos programas como herramientas sino como instrumentos, dado que, de ese modo, **el usuario está en capacidad de resolver problemas puntuales al generar sus propias herramientas**, produciendo interpretaciones originales para soluciones específicas.

Las plataformas que más han promovido y facilitado esa posibilidad son las de modelado paramétrico y algorítmico de interfaz gráfica, además de ser las de más rápida popularización en años recientes. A pesar de que sus antecedentes se remontan a programas de edición de sonido o de efectos visuales, esta modalidad ha ido creciendo dentro de los programas CAD y modelado 3d (no así en el caso específico de AutoCAD), dada la relativa facilidad para su aprendizaje.

Una de las primeras y más reconocidas plataformas ha sido *Generative Components* creada por Robert Aish para el programa *Microstation* y posteriormente *Grasshopper* por David Rutten para *Rhinoceros 3d*. Esta última al ser una aplicación de código abierto, ha permitido que una creciente comunidad de usuarios con cierto grado de destreza en programación, puedan contribuir a extender sus prestaciones. De igual forma, han surgido otras plataformas similares para el software BIM. A pesar del alto grado de especificidad constructiva que estos programas imponen, permiten trabajar con entidades geométricas genéricas. Ese es el caso de programas como *Dynamo* para *Revit* y *Marionette* para *Vectorworks*.

Es precisamente debido a plataformas de parametrización como esas, que el diseño computacional ha ganado no solo una gran popularidad entre los arquitectos durante la última década, sino además profundidad y propósito. Este fenómeno ha promovido la creación de nuevas especializaciones en la academia y la aparición de nuevas formas de investigación en diseño dentro del estudio y la práctica de la disciplina misma. Pero aún más notable, resulta el surgimiento a nivel global de equipos especializados de investigación y desarrollo dentro de múltiples oficinas de arquitectura, ingeniería y construcción, así como también de empresas especializadas en asistir a diseñadores y constructores en estos procesos y desarrollos.

---

Estos equipos de trabajo abarcan una pluralidad de avances que van desde la creación de nuevas herramientas digitales de diseño y fabricación hasta la síntesis de nuevos materiales. Este tipo de especialistas que “hace 10 o 20 años no existían (...) no han establecido un cuerpo de conocimiento de base. En cambio, están desarrollando conocimiento *pro re nata*” (Davis, 2015). Por ello, en muchos casos ni siquiera se emplea software existente en el mercado, **teniendo que desarrollar a partir de ese mismo, herramientas en respuesta a necesidades específicas, lo que supone un esfuerzo adicional para cada proyecto**. En adición a esto, la computación física<sup>10</sup> abre otra puerta para el prototipado y desarrollo de dispositivos interactivos. Bien sea como instrumentos complementarios dentro de procesos de diseño y/o manufactura o que inclusive pueden ser incorporados a la edificación, a través de mecanismos que le permiten responder a las condiciones del medio que la rodea. Esto significa, el uso de micro-controladores electrónicos de código abierto (véase por ejemplo Wiring, Arduino, Raspberry-Pi, BeagleBone, LittleBits, entre otros), conjuntamente con sensores y actuadores, que enlazados a través de programas de modelado paramétrico, permiten prototipar mecanismos *reactivos*<sup>11</sup>, basados en requisitos sencillos, en donde se están proponiendo nuevas e interesantes posibilidades de concepto y realización sobre el futuro de la edificación interactiva y personalizada.

A raíz del uso de todos estos avances, múltiples autores consideran el modelado paramétrico como una herramienta de representación, puesto que estas tecnologías permiten, además, el desarrollo de soluciones a medida, en donde estos autores se consideran a sí mismos **fabricantes de herramientas**, más que simples usuarios expertos (Davis, 2013).

---

<sup>10</sup> Consiste en la construcción de dispositivos a partir de microcontroladores electrónicos interactivos a través del uso de software y hardware que puede percibir y responder a estímulos (movimiento, contacto, luz, humedad, presión, gravedad, etc.) del medio físico análogo.

<sup>11</sup> El término en inglés “*responsive*” ha sido interpretado aquí como *reactivo*, teniendo en cuenta que una de sus traducciones literales es “que reacciona”. Dentro del contexto del diseño computacional, el diseño interactivo y la computación física, los términos “*responsive*” y “*responsiveness*” son frecuentemente empleados para indicar esa cualidad en referencia a la reacción en cuanto a la forma de un objeto, mecanismo o dispositivo que sufre alguna modificación con respecto a cambios en variables externas, como por ejemplo factores ambientales o interacciones con el usuario, entre otros.

Pero más allá de permitir la representación de geometrías complejas, las herramientas computacionales de diseño, ajustadas a necesidades puntuales o no, en la actualidad ya han sido empleadas en una amplia y creciente variedad de aplicaciones en proyectos construidos a nivel mundial. Si bien su propósito pudo haber estado orientado a facilitar la exploración y generación de formas arquitectónicas innovadoras, también han sido de gran utilidad en la optimización de las mismas en diversos aspectos. De esta forma se viene sentando el precedente acerca de cómo nuevos flujos de trabajo posibilitados por estos instrumentos, configuran y transforman el ejercicio integrado entre arquitectura, ingeniería y construcción.

Al recapitular todo lo anteriormente estudiado hasta este punto, se resaltan algunos recursos metodológicos a disposición de los arquitectos, en donde la conjunción de variables tanto estéticas como funcionales, facilitan su labor. Estos comprenden, la utilización de modelos físicos como dispositivos para la generación de formas arquitectónicas estructurales en los cuales el comportamiento material es considerado como una variable, con lo que se facilita la simulación real en escalas posibles lo que fuera a ser en escalas probables. Pero también, se destaca el uso de herramientas computacionales, las cuales han permitido considerar factores de *constructibilidad*, esto es, la factibilidad y racionalidad constructiva de geometrías complejas, del mismo modo como lo hicieron en su momento los modelos físicos, pero ahora con ganancias añadidas tales como una mayor precisión y velocidad, pero fundamentalmente con la posibilidad de involucrar una multiplicidad de variables además de lo estructural, material o constructivo y la facilidad de la exploración de una variedad de alternativas en cada diseño.

También esto ha permitido observar impactos para la arquitectura y la construcción, tales como la creación de nuevos roles dentro de la profesión, aparición de nuevas formas de investigación en diseño, aplicadas sobretodo en nuevos usos para materiales tradicionales y nuevos materiales en necesidades tradicionales. Presentándose de esta forma, un factor de oportunidad para la innovación tecnológica en compañías de los sectores de arquitectura, ingeniería y construcción, afectando los modos de hacer que cada vez más deben ser tenidos en cuenta.

---

## 1.3 Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y procesos de optimización

La *Ingeniería Asistida por Computador* o *Computer Aided* o *Assisted Engineering* (CAE por sus siglas en inglés) consiste en el empleo de programas que permiten la evaluación de partes, ensambles y componentes de diversa naturaleza, así como también para el análisis de flujo de sustancias, transferencia de calor y electromagnetismo. Sus orígenes se remontan a la década de los años sesenta en aplicaciones para la resolución de problemas complejos de ingeniería aeroespacial, que luego encontraron aplicabilidad en otras ramas de la ingeniería como la electrónica, la mecánica y la civil. Sin embargo, el concepto matemático subyacente, tuvo lugar en los años cuarenta, el cual recibió importantes aportes durante la década siguiente.

Fundamentalmente, dos métodos numéricos matemáticos componen la CAE, los cuales serían implementados en las aplicaciones computacionales. Uno es el *Método o Análisis de Elementos Finitos* (*Finite Element Analysis* o *Finite Element Method FEA* o *FEM* por sus siglas en inglés) que consiste básicamente en la **subdivisión de la geometría a analizar, a partir de un modelo tridimensional, en pequeñas regiones discretas simplificadas e interconectadas que conforman una malla poligonal**. El menor o mayor grado de subdivisión de esa malla, determina el nivel de precisión del análisis, al comparar los desplazamientos de los nodos respecto a su posición inicial tras la aplicación de una fuerza simulada y ante la previa alimentación de datos de material real o supuesto para diferentes desarrollos.

El otro método, es la *Dinámica de Fluidos Computacional* (*Computational Fluid Dynamics* o *CFD* por sus siglas en inglés) el cual permite realizar la simulación del comportamiento dinámico de determinados fenómenos físicos en forma de flujo, como por ejemplo las corrientes de aire (pudiendo ser también humo, agua, congelamiento, combustión, etc.), dentro y alrededor de una edificación, así como también los esfuerzos o deformaciones de una estructura bajo determinadas condiciones termodinámicas. Esto se logra discretizando el espacio a analizar, en una malla de pequeños volúmenes de control, y resolviendo ecuaciones específicas de forma iterativa para cada uno de ellos.

La CAE como desarrollo tecnológico surgió simultáneamente con y ha evolucionado paralelamente al concepto de CAD, siendo que este último en su concepción original planteaba generar descripciones gráficas paramétricas de elementos determinados para su representación y análisis, en donde sin embargo Coons -su inventor- “veía los materiales (su comportamiento como variable de diseño) como un obstáculo para la creatividad”, los cuales se interponen en la labor creativa del diseñador y por lo tanto ese trabajo “sucio” debía ser dejado en manos del computador (Cardoso, 2012).

Aunque su aplicación dentro de los procesos de diseño arquitectónico ha venido desempeñando un papel complementario desde la masificación de la computación, es desde hace relativamente poco tiempo, que el uso de la CAE se está convirtiendo en una práctica cada vez más extendida. Esto hace pensar que, lo que significó el uso del CAD en el diseño, ha tenido un impacto igual o tal vez superior en la ingeniería, al punto de considerar en la actualidad un proyecto inconcebible sin su uso. Por lo anterior, la CAE constituye uno de los campos a tener en cuenta en torno al uso de la computación aplicada en el diseño y la construcción de edificaciones por su valiosa utilidad.

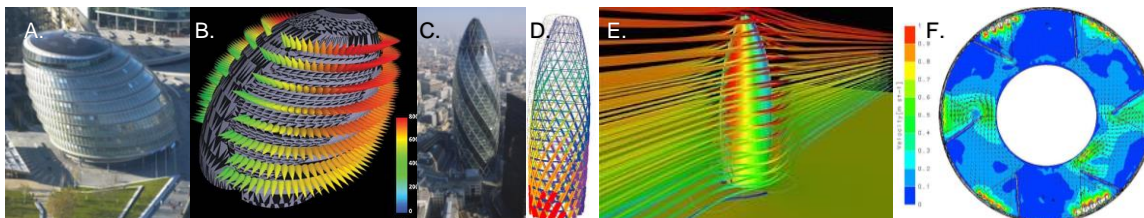
Hoy en día **su aplicabilidad se evidencia en el estudio de fenómenos relacionados con la física de la edificación**, en procesos tales como la simulación del comportamiento estructural ante esfuerzos específicos, así como también de variables ambientales dentro de los que cabe mencionar análisis de ganancia solar o flujos de aire. Esto ha ocurrido a partir de la facilidad de generar información cuantitativa más precisa y confiable en los procedimientos de cálculo y análisis, propios del uso del computador. Esto ha facilitado en buena medida, el análisis para la correcta aplicación de principios de diseño ambiental (o bioclimática, como se le denomina tradicionalmente en el medio colombiano), como meta global dentro del ejercicio arquitectónico y constructivo en la actualidad.

Un par de casos que ejemplifican la práctica de lo anterior, se pueden ver en proyectos relativamente recientes, tales como la torre Swiss Re o el edificio Greater London Authority en Londres, diseñados por el arquitecto Norman Foster y cuyo desarrollo de ingeniería lo realizó la empresa Arup (ver figura 1-12). En ambos casos, la forma arquitectónica se derivó inicialmente de una interrelación paramétrica de variables geométricas, que fueron modificadas posteriormente de acuerdo a aspectos funcionales

para los que se emplearon simulaciones, hasta obtener un resultado balanceado entre tales aspectos funcionales y la forma arquitectónica.

**Figura 1-12:** Aplicación de la CAE para optimización de la forma arquitectónica.

A. Edificio Greater London Authority. B. Análisis de ganancia solar sobre sus fachadas mediante CFD. C. Torre Swiss Re, Londres. D. Análisis de esfuerzo estructural mediante FEA. E y F. Análisis de flujos de aire alrededor y al interior.



Fuentes: A y C. Foster + Partners – B, D, E y F: Arup Engineering.

Con fines similares a los expuestos en los ejemplos anteriores, en la CAE, los programas de simulación y análisis emplean convencionalmente como método de resolución de problemas de diseño e ingeniería, procedimientos de optimización.<sup>12</sup> Estos procesos consisten en la instrumentalización de diversos algoritmos para propósitos específicos. Sin embargo, dichos procedimientos de optimización son susceptibles de ser integrados en algunos programas de modelado paramétrico, a fin de estudiar múltiples alternativas de diseño, incluso desde los estados más tempranos de la etapa de diseño.

Esto quiere decir que, mediante una secuencia de instrucciones combinadas, se puede generar un sinnúmero de variaciones, derivadas de la modificación de ciertos parámetros definidos por el diseñador. Si bien los resultados de tales variaciones, pueden ser obtenidas por la modificación “manual” de tales parámetros, estos también pueden ser obtenidos de forma relativamente automatizada y orientada por criterios igualmente especificados por el diseñador, a fin de **optimizar** el producto final. Dichas variaciones serían entonces presentadas y ordenadas a través de un diagrama de Pareto, mediante

<sup>12</sup> En sentido general, la optimización se refiere a la mejor manera de realizar una actividad determinada, sin embargo, en el contexto matemático e informático que son a los cuales se hace referencia aquí, se trata del método para determinar valores (mínimos o máximos según corresponda) de las variables que intervienen en un proceso o sistema para elegir el mejor resultado posible.

algoritmos específicos encargados de buscar y elegir el mejor elemento dentro de dicho conjunto de variaciones, de acuerdo con escalas de valores para cada parámetro modificado (el máximo o mínimo valor, positivo o negativo según corresponda en cada parámetro evaluado). A este rango de búsqueda se le conoce como “espacio de diseño”. En otras palabras, el modelo paramétrico mediante el que se definen las variables de diseño modificables, se puede complementar con el uso de un determinado algoritmo con el fin de encontrar, un estado lo más cercano posible a un ideal, de acuerdo con el objetivo o solución buscada, establecida mediante uno o varios criterios de idoneidad.

Surgen así dentro de los procesos de optimización, dos enfoques estadísticos, la **explotación** y la **exploración**. En el primero, el estado ideal de solución (o valor máximo global simple) proviene de un espacio de diseño de poca variación entre sus elementos, los cuales se encuentran, sin embargo, por encima de un valor mínimo admitido con el fin de hallar una solución, generalmente la más eficiente. En el segundo enfoque, un conjunto mucho más amplio de resultados y mucho más variados, pero igualmente cercanos al criterio de idoneidad definido (múltiples locales máximos), da la posibilidad al diseñador de elegir, bajo su propio criterio de forma menos determinista<sup>13</sup> que como lo hace un algoritmo por sí solo. Es posible observar una representación abstracta de estos enfoques en la figura 1-13.

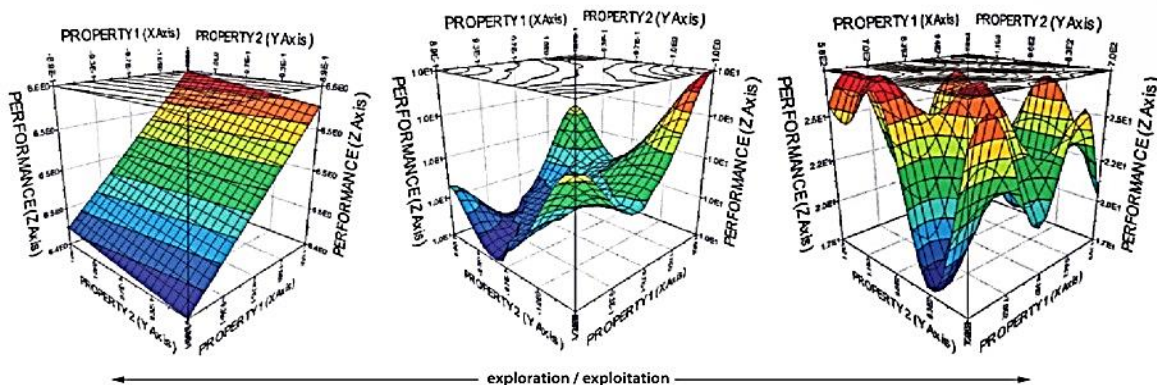
---

<sup>13</sup> En el contexto de las matemáticas y la física, un sistema determinista es aquel en donde sus los resultados no están condicionados por el azar, produciendo siempre los mismos a partir de las condiciones iniciales. En contraste a estos, existen los sistemas aleatorios o estocásticos, en donde el resultado o estado futuro de un sistema es producto de su estado anterior.



**Figura 1-13:** Espacios de diseño desde exploración a explotación.

Cada uno de los esquemas gráficos representa un espacio de diseño de un problema diferente para la búsqueda de una solución optimizada, en donde cada superficie representa la variabilidad de las alternativas generadas. Así, de lo menos a lo más complejo (de izquierda a derecha) encontrar un punto máximo de solución para un problema específico mediante la explotación, es un procedimiento relativamente más directo que mediante la exploración, en donde el criterio está en manos del diseñador.



Fuente: (Benjamin, 2012).

Dentro de los aspectos de desempeño de la edificación más comúnmente optimizados por técnicas algorítmicas, se encuentran variables ambientales como por ejemplo de tipo lumínico (natural o artificial), térmico o acústico. Pero también existen de orden estructural (por ejemplo, de optimización topológica) o mecánico, entre otras, como por ejemplo la planificación de rutas de evacuación. No obstante, estos mismos tipos de algoritmos también han sido empleados como mecanismos generativos para la exploración de morfologías arquitectónicas novedosas, lo cual, si se quiere podría considerarse como el desempeño estético de la edificación. Aquí se describen algunos de los algoritmos más comúnmente empleados:

- **Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms):** Es un proceso de imitación de la evolución natural dentro de un entorno artificial. Esto quiere decir que el conjunto de posibles soluciones de diseño, es tratado como una población de “individuos”, en donde de forma análoga se llevarán a cabo procedimientos de hibridación (cruce), selección natural y herencia de sus características. Esta clase de algoritmos ha sido empleada para optimización en problemas relacionados con aspectos estructurales y mecánicos de la edificación.

- *Algoritmos de Enfriamiento Simulado (Simulated Annealing<sup>14</sup>):* Este tipo de algoritmo tiene por objetivo, hallar aleatoriamente un valor óptimo por aproximación para una variable evaluada, es decir, que admitiendo otros valores cercanos a su valor óptimo global, puede decidir entre cambiar a un nuevo valor o permanecer en dicho valor óptimo.
  
- *Algoritmos de Enjambre (Particle Swarm Optimization):* A partir del modelamiento matemático del comportamiento de diversos enjambres en la naturaleza (por ejemplo, de aves o peces), una simplificación de dicho modelamiento permitió adaptar su lógica interna como un algoritmo para optimización. Las variaciones generadas por los parámetros del problema a optimizar son entendidas aquí como partículas (individuos que conforman el enjambre), el objetivo es obtener los mejores resultados de acuerdo a un criterio establecido -generalmente a partir de simulaciones de los desempeños que se requiere optimizar- a partir del movimiento dentro del espacio de diseño generado, procedimiento que se repetirá hasta alcanzar una posición óptima o lo más cercana posible a ella.

Explotación y exploración son enfoques de la optimización que deben entenderse y usarse cuidadosamente bajo estrategias de diseño, para evitar llegar a extremos que arriesguen la funcionalidad o la estética del diseño. De acuerdo con Benjamin (2012) “depender fuertemente de optimización y desempeño como motores del diseño es caer bajo el hechizo de un peligroso mito de eficiencia”, pero del mismo modo “depender exclusivamente del juicio y la intuición para abordar problemas arquitectónicos complejos es caer bajo el hechizo de otro mito peligroso - un mito de creatividad”.

Cualquiera que fuera el caso, los resultados obtenidos mediante la optimización, enriquecen el proceso de toma de decisiones, puesto que ofrecen una mayor variedad de opciones, en menor tiempo y con mayor precisión, en comparación con métodos tradicionales de diseño. Sin embargo, la propia naturaleza de los problemas de diseño arquitectónico, hace que estos sean irreducibles a factores y variables puramente

---

<sup>14</sup> Este nombre resulta de la analogía con el proceso de re-cocción y enfriamiento realizado al acero y la cerámica, dado que el proceder de este tipo de algoritmo, se asemeja al fenómeno físico que ocurre a nivel molecular en dichos procesos.

numéricas. Esto quiere decir que, no pueden ser exclusivamente objetivas ni cuantificables, así, por ejemplo, decisiones respecto al aspecto estético o de la atmósfera que se pretende para un espacio, requieren otro tipo de criterios para su evaluación.

Alcanzar un balance entre la mera eficiencia de la optimización computacional y la intuición del diseñador, podría eventualmente ser logrado a través de un criterio multi-objetivo de optimización. En esta modalidad de exploración, que aún no se aplica ampliamente en el diseño arquitectónico, múltiples variables cuantitativas y cualitativas pueden conjugarse bajo parámetros tanto objetivos como subjetivos, facilitando la toma de decisiones (Benjamin, 2012), demostrando con ello la gran flexibilidad que los instrumentos digitales pueden proveer.

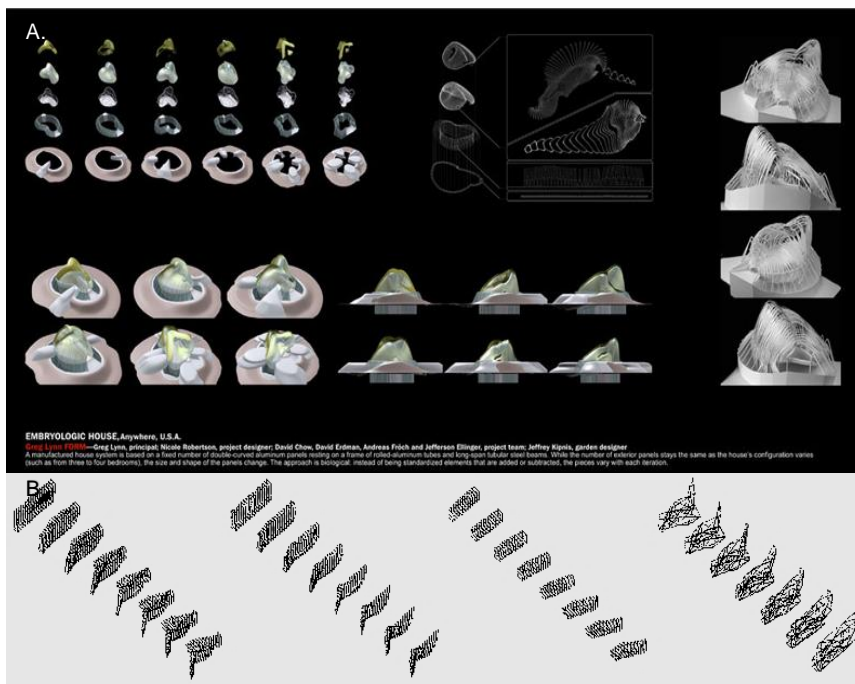
Para concluir, sobre el uso de la CAE se puede considerar que es un conjunto de herramientas de muy alto valor dentro del proceso de diseño de edificaciones, al facilitar la validación de aspectos de diseño de diversa índole, que afectan directa e indirectamente lo constructivo, dentro de los que se encuentran cada vez más comúnmente variables de orden estructural y ambiental. Así mismo, su conjugación con el modelado paramétrico y técnicas algorítmicas de optimización, ha permitido que sean empleadas como herramientas generativas en la producción de formas dentro de los procesos creativos. Sin embargo, sobre este último aspecto, el de la optimización algorítmica independientemente de su finalidad, se debe prestar especial atención para evitar una dependencia exclusiva y poco objetiva sobre el uso de los medios digitales.

## **1.4 Diseño computacional en la arquitectura y su impacto en la construcción**

Como ya se ha visto, las posibilidades que dan las herramientas computacionales han suscitado que, durante las décadas recientes, se hayan explorado múltiples enfoques novedosos con fines creativos, en adición a los descritos hasta ahora. Estos consisten principalmente en la exploración del potencial de la forma arquitectónica como resultado de procedimientos llevados a cabo con programas de modelado tridimensional y la llamada animación computarizada.

Algunos de ellos incluyen, transformación de geometrías mediante animación de campos de fuerza y flujos de partículas, exploraciones topológicas (torsiones, dobleces) mediante composiciones de polisuperficies isomórficas o hipersuperficies, metamorfosis de geometrías manipuladas mediante un lapso de tiempo (keyshape o keyframe animation, morphing), evolución de formas a través de algoritmos genéticos, (esta última ya descrita, pero sin vincular estrictamente parámetros funcionales). Las propuestas exploratorias realizadas -aunque nunca construidas- desde principios de los años noventa, por arquitectos como John Frazer, Karl Chu, Sulan Kolatan y Bill MacDonald, Peter Eisenman o Greg Lynn (ver figura 1-14), han sido considerados trabajos pioneros, respecto a los avances logrados más recientemente con herramientas de modelado paramétrico. Todas estas aproximaciones bien sean metodológicas o estilísticas, **en términos de lo constructivo se caracterizan por la alta complejidad formal que implican** que, a su vez por ser de corte experimental e instrumental para la ilustración de nuevas teorías en torno a una comprensión más compleja de la forma, el espacio y su representación mediada por herramientas digitales, carecen por lo general, de un sistema de resolución constructiva.

**Figura 1-14:** Variaciones de la forma arquitectónica mediante animación computarizada. A. Embryological House, Greg Lynn. B. Diagramas de deformación biblioteca Lihuei de la Universidad de Ginebra, Suiza, Peter Eisenman.



Fuente: A. [www.docam.ca](http://www.docam.ca) – B. (Kolarevic, 2003)

---

No obstante, uno de los enfoques que ha surgido a lo largo de este periodo, es el denominado **diseño orientado al o basado en el desempeño**,<sup>15</sup> el cual tiene que ver con la instrumentalización de diversos aspectos del desempeño funcional de la edificación, a modo de principios de diseño. A través de herramientas computacionales de simulación como los programas de CAE, como ya se explicó en el ítem anterior de este capítulo, es posible desde etapas iniciales del diseño, generar, analizar y optimizar escenarios posibles para uno o varios aspectos específicos de desempeño de la edificación. Esto permite evidenciar, cómo los criterios estéticos son sopesados por criterios funcionales -y según el caso, constructivos-, a la vez que son supeditados por estos mismos, y donde al final, la expresividad formal y la estética son resultado de un proceso fundamentalmente racional.

En términos generales, los enfoques de diseño que hasta aquí se han mencionado, contrastan a todas luces con las metodologías, medios y técnicas más tradicionales de diseño. Los medios digitales posibilitan procesos exploratorios mediados por altos niveles de lógica, orden y control, pero también si así se requiere, pueden incorporar cierto grado de aleatoriedad introducido premeditadamente. A partir de este planteamiento, es que la exploración conceptual tanto en lo geométrico como en lo tectónico, se centra en el estudio de las propiedades emergentes<sup>16</sup> y de auto-organización en configuraciones arquitectónicas y constructivas, que son resultado de la relación entre forma, estructura y material, ligados íntimamente a través de la noción de desempeño, del mismo modo como sucede en entornos y fenómenos observables en la naturaleza en diversas escalas.

*Morfogénesis*, palabra que literalmente significa “origen de la forma”, del griego “morphê” forma y “génesis” creación, es un concepto original de la biología y la geología. En esos contextos se refiere a “la lógica de la generación de la forma y producción de patrones en organismos a través de procesos de crecimiento y diferenciación” (Leach, 2009). En su

---

<sup>15</sup> Performance-based Design (Kolarevic, 2003, 2005), Performance-oriented Design (Hensel, 2013).

<sup>16</sup> Se refiere al concepto de “*emergencia*” o “*surgimiento*,” proveniente de la filosofía, pero con ejemplos observables en fenómenos de la biología o ciencias de la computación, en donde las propiedades o procesos de un sistema, no se pueden reducir a las propiedades o procesos de sus partes. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Emergencia\\_\(filosofia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Emergencia_(filosofia))

aplicación como enfoque de diseño arquitectónico, la **morfogénesis digital** (Kolarevic, 2000, 2003, 2005; Roudavski, 2009), propone la comprensión de la arquitectura y sus procesos de materialización, de manera sistémica y evolutiva. Según este enfoque, la búsqueda de la forma arquitectónica debe responder a las condiciones propias de un contexto determinado, si bien esto no se refiere a la adopción de mecanismos de crecimiento o adaptación, como en algunos sistemas biológicos. La finalidad última de este enfoque es “retar la hegemonía de los procesos tipo top-down<sup>17</sup> del form-making, y reemplazarlos con las lógicas bottom-up del form-finding” (Leach, 2009).

La morfogénesis digital promueve una comprensión holística tanto de los materiales y sus propiedades, como de los procesos que les dan forma, orientándolos a hacia la generación de configuraciones arquitectónicas y estructurales de mayor eficiencia, mediante la redundancia y la diferenciación de sus componentes, que como ya se mencionó, debería ser de forma similar a como sucede en diversos fenómenos naturales. Para lograr dicha eficiencia, se acude a la computación como el medio que permite, de manera virtual, gestionar procesos de diseño retroalimentados, por un lado, por información extraída de un entorno físico real -comportamiento estudiado de materiales, por ejemplo: resistencias, conductividad, estabilidad dimensional, etc. y por otro, de variables del contexto físico, por ejemplo: temperatura, humedad, presión, etc.-

Por consiguiente, dicha información no proviene únicamente, ni afecta exclusivamente características de diseño, también proviene de y afecta a determinados aspectos constructivos. Esta reconceptualización sobre el comportamiento de los materiales y la posibilidad de activarlos como mecanismos con base en sus propiedades, se ha denominado **computación material**, de donde a su vez otro concepto que se desprende,

---

<sup>17</sup> Top-down ('de arriba abajo') y bottom-up ('de abajo arriba') son estrategias de procesamiento de información en el software, pero se aplican a otras ciencias sociales y exactas. En el *top-down* se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles, cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo. En contraste, en el *bottom-up* las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. El *bottom-up* se basa en el conocimiento de todas las variables que pueden afectar los elementos del sistema. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Top-down\\_y\\_bottom-up](https://es.wikipedia.org/wiki/Top-down_y_bottom-up)

---

el de los **sistemas materiales**, el cual estudia el surgimiento de reacciones sinérgicas entre combinaciones de diversos materiales.

En adición a esto, el paradigma de la eficiencia en la arquitectura e ingeniería que ha regido especialmente desde la modernidad, tiende a desestimar condiciones específicas en cada caso, como por ejemplo sobre el lugar o la función arquitectónica, favoreciendo la adopción y aplicación de tipologías probadas y preestablecidas (por ejemplo, estructurales: vector, forma o superficie activos; o climáticas: dobles pieles, fachadas ventiladas, etc.) de acuerdo a la naturaleza de cada proyecto. Resultando así, formas de diseño y construcción que contrarias a lograr un aprovechamiento óptimo y de paso sostenible de los recursos, están orientadas al cumplimiento de expectativas de desempeño excesivas, dimensionando y especificando elementos con valores y tolerancias máximas y desconociendo que hay una variedad heterogénea de requerimientos (Hensel y Menges, 2006).

Asimismo, a partir de la visión que ofrece este enfoque, se han abierto nuevos caminos de exploración que se empiezan a constituir como campos de investigación importantes, como es el caso de la *biomimética* (también conocida como *biomimesis*), que se refiere al “estudio de lo que se puede aprender al replicar (en el diseño) mecanismos de la naturaleza” (Leach, 2009). Ejemplos de lo que se ha investigado y propuesto al respecto, con implicaciones interesantes para la construcción, tanto en procesos productivos como en la comprensión mejorada de materiales tradicionales en la construcción o la síntesis de otros nuevos provenientes de otros usos, se pueden observar en los ejercicios académicos de pabellones que se han realizado en años recientes, en la universidad de Stuttgart en Alemania. Algunos de estos ejemplos, se tratarán brevemente a través de los próximos ítems de este mismo capítulo.

En sí mismos, diseño orientado al desempeño y morfogénesis digital, son manifestaciones del diseño computacional muy similares, puesto que comparten un acervo instrumental en su proceder (empleando los mismos instrumentos: modelado paramétrico, simulación, análisis, optimización algorítmica), pero también las mismas preocupaciones sobre eficiencia, especialmente en lo que respecta a lo material y su desempeño. Preocupaciones que, además de conllevar una postura ética en su aspiración a convertirse en paradigmas de abordaje alternativos en el tema de

sostenibilidad en la arquitectura, contienen repercusiones ineludibles en las prácticas constructivas, objetivo que, si bien podría estar aún lejos de lograrse, sus inicios potenciales ya se están dando. Al eliminar de la ecuación de los procesos de diseño, la larga tradición de la jerarquía de la forma bajo la cual todos los otros aspectos del diseño de la edificación están supeditados, y en cambio incluirlos como insumos de (in)formación, se estaría dejando atrás una práctica fuertemente establecida de optimización post-diseño, especialmente presente en aspectos como el estructural y el ambiental (Hensel y Menges, 2006).

Como se puede observar, el conjunto de enfoques derivados del uso del computador en el diseño, ha posibilitado la exploración y representación de nuevas complejidades estéticas que desafían antiguas nociones ampliamente fundamentadas sobre la base de la geometría euclidiana, y desvirtúa concepciones tradicionales sobre la funcionalidad. No obstante, de los ejemplos hasta ahora estudiados, se extraen esencialmente dos vertientes metodológicas que siguen presentes en el debate arquitectónico contemporáneo sobre el origen de la forma y su relación con la función y el entorno, estas son *form-making* y *form-finding*, explicadas anteriormente.

Proyectos arquitectónicos contemporáneos concebidos bajo una u otra óptica, pero siempre con la intervención del computador, han tenido un impacto innegable en las prácticas constructivas. A un punto tal que, para asegurar la materialización de las formas complejas, resultado de los procesos de diseño, paulatinamente y de manera complementaria a las tecnologías y prácticas convencionales establecidas en la industria de la construcción, se suman otras, las de la fabricación digital que, interconectadas mediante el computador, facilitan el objetivo de construir esas formas complejas, como se explicará a continuación.

## **1.5 Fabricación digital o Manufactura Asistida por Computador (CAM)**

El deseo y la posibilidad de materializar formas y estructuras complejas no es algo nuevo en la arquitectura, sin embargo, la facilidad que la tecnología digital suscita en este aspecto, a causa de su gran flexibilidad y precisión, no tiene precedentes en la construcción. La prefabricación, un proceso de producción masivo de componentes



---

estandarizados para la construcción, heredado de la modernidad, ha demostrado ser un modelo de producción altamente eficiente en la construcción, especialmente en edificaciones repetitivas, puesto que acelera el desarrollo de una obra, a la vez que garantiza el control de calidad y la reducción de sus costos. Sin embargo, este modelo de producción es susceptible de evolucionar a través de la mencionada tecnología.

Tradicionalmente, cuando se trata de construcciones con cierto grado de singularidad, formal o estructural, y cuyos procesos y sistemas constructivos no son completamente estandarizados, su producción implica altos costos o se demanda un alto grado de destreza con técnicas que la mano de obra disponible probablemente no tiene. No obstante, estas han sido dificultades típicas que se han sabido manejar. Un par de ejemplos, pueden observarse en la optimización de procesos y sistemas constructivos que en sus respectivas obras hicieron, el arquitecto Félix Candela y el ingeniero Heinz Isler (ver figura 1-15).

En ambos casos se trató de estructuras singulares de tipo cáscara delgada en concreto (paraboloides hiperbólicas o *hypar* de bordes curvos y rectos en el caso de Candela y cáscaras a partir de una membrana colgante invertida en el caso de Isler), que si bien, en ambos casos fueron muy eficientes en el uso del material, sus procesos constructivos requirieron mejoras para alcanzar una relación de costo-efectividad para mantenerse suficientemente competitivas en el mercado.

En el caso de Candela, en la elaboración de formaletas artesanales complejas, se debieron reemplazar piezas curvas por rectas en las cimbras para poder ser reutilizadas, lo que conllevó a crear un tipo de cubiertas más estandarizadas conocidas como “sombrillas”, uniendo cuatro *hypars* de bordes rectos que, aunque mucho menos singulares en su forma, reducían los costos de producción. Por su parte Isler, para el mismo resultado empleaba arcos de madera laminada que podían ser reutilizados un determinado número de veces, y hasta cierto punto también ser utilizados en casos de formas menos estandarizadas, junto con tableros de aglomerados que además de encofrado, actuaban como protección del clima y de variaciones de temperatura durante el fraguado (Moreyra y Billington, 2014).

**Figura 1-15:** Procesos constructivos optimizados en estructuras de forma libre.

A. Cimbra usando piezas rectas de madera para capilla Lomas de Cuernavaca de Félix Candela.  
B. Capilla terminada. C. Estación de servicio BP de Heinz Isler. D. Arcos de madera laminada empleados como cimbra en las obras de Isler.



Fuente: (Moreyra y Billington, 2014).

Contrario a este tipo de dificultades, hoy en día, cuando se requiere producir construcciones con un cierto grado de complejidad formal y/o estructural, característica cada vez más común en la arquitectura contemporánea, especialmente al ser concebidas con la asistencia del computador, un rasgo común es la variación continua de sus componentes. Esto significa que deliberadamente, estos pueden diferenciarse entre sí en una o varias de sus características, como por ejemplo en su forma, tamaño, posición, número o tipo de uniones, secuencia de ensamble, grados de apertura, entre otras.

La **Fabricación Digital**, **Manufactura Avanzada** o **Manufactura Asistida por Computador** (Computer Aided o Assisted Manufacturing o CAM por sus siglas en inglés), se refiere al uso extensivo de maquinaria de **Control Numérico Computarizado** (o **CNC** por sus siglas en inglés). Con ella se facilita la producción de piezas o elementos con las características antes mencionadas. Un computador conectado de forma exclusiva a una máquina CNC, es el encargado de traducir la geometría a producir, a coordenadas y trayectorias de desplazamiento de un cabezal, mediante la transformación del material con un muy alto grado de precisión. Estas coordenadas y trayectorias son un conjunto de instrucciones codificadas en un lenguaje de programación conocido como *código G*, bastante abstracto en su sintaxis para la comprensión humana, pero suficientemente claro para las máquinas.

Solo hasta hace relativamente poco tiempo, la construcción cuenta con este tipo de herramientas de producción industrial a medida, por demanda, automatizadas, flexibles y de alta precisión. Su uso implica que “el grado de facilidad y la relación costo-beneficio es igual al generar, por ejemplo, mil piezas únicas o mil piezas idénticas” (Kolarevic, 2005)

---

puesto que ello depende del “tiempo de la máquina, no de la forma o variedad de las partes, de modo que no hay sobrecostos dada la complejidad o diferencia” (Holden, 2012).

Sin embargo, la fabricación digital no se reduce exclusivamente a la producción de piezas, también puede comprender la automatización de procesos tales como transporte, almacenaje o gestión de materias primas y productos. Aunque inicialmente fue concebida como un desarrollo tecnológico para la flexibilización de la manufactura en la producción de elementos en otras industrias como la militar y la aeronáutica, la fabricación digital, se extendió hasta otras industrias como la automotriz y la naval. En el caso de la construcción, sin embargo, solo hasta hace relativamente poco se emplea en la producción de algunos componentes constructivos no estandarizados.

Así, a partir de esta lógica, el paradigma de la era industrial imperante hasta ahora, la producción en masa, entraría a ser desplazado paulatinamente por el de la personalización en masa o **mass customization**, que desde ya apunta hacia su consolidación en toda la industria manufacturera, proceso que incluye a la industria de la construcción. Este fenómeno ya viene ocurriendo principalmente en países desarrollados, en donde la industrialización de la construcción es una práctica consolidada desde hace varias décadas, a pesar de que, según Paoletti y Tardini (2011), la industria de la construcción es considerada frecuentemente como “de baja intensidad en investigación y caracterizada por ser conservadora y de resistencia a la innovación tecnológica”. La implementación de este paradigma, representado en el uso creciente de estas tecnologías en la construcción, se irá orientando gradualmente hacia las necesidades de los usuarios y del contexto, aunque por ahora, solo representa un cambio en las relaciones y procedimientos entre diseñadores, fabricantes y constructores.

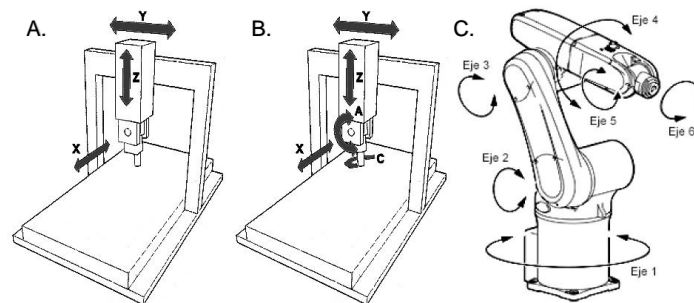
Para comprender mejor esta tecnología y sus alcances, se requiere entonces estudiar en detalle sus capacidades, que se clasifican de acuerdo con el tipo de transformación que realizan a un determinado material, pero también según su capacidad de ejecutar tales transformaciones en el espacio, como se observa en la figura 1-16. Es decir, según sus ejes de desplazamiento, rotación y las combinaciones entre los mismos, a lo que se conoce como rango cinemático, clasificado así: máquinas de 2, 3, 4 y 5 ejes, donde 2 y 3 ejes se refieren a desplazamiento lineal en los ejes cartesianos X y Y o X, Y, Z

respectivamente, mientras que 4 y 5 ejes, a desplazamiento rotacional respecto a los ejes X, Y, Z. Como también se mencionó, se clasifican de acuerdo al tipo de transformación del material, así:

- fabricación bidimensional y sustractiva
- fabricación aditiva
- fabricación formativa

**Figura 1-16:** Rangos cinemáticos de la maquinaria CNC y robótica.

A. 3 ejes. B. 5 ejes. C. Brazo robótico de 6 ejes.



Fuente: Elaboración propia adaptado de Kolarevic, 2003.

Existe además un grupo adicional de maquinaria, que supera las limitaciones típicas de la maquinaria de los grupos ya mencionados, que se denomina **fabricación robótica**, en la cual, como su nombre lo indica, se emplean brazos robóticos de 6 ejes. Esta maquinaria, mucho más sofisticada que la de los grupos anteriores, puede integrar cualquiera de esas modalidades en procedimientos más complejos. Estos grupos y su aplicación en la construcción, se describirán a continuación.

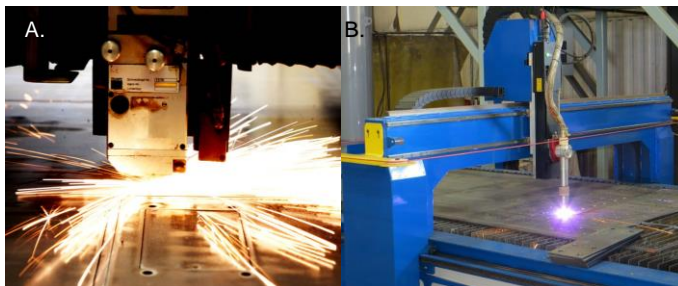
### 1.5.1 Fabricación Bidimensional y Sustractiva

La fabricación bidimensional comprende maquinaria que corta o graba mediante una reacción térmica, que puede ser pueden ser el rayo láser o el arco de plasma, en dos direcciones (ejes X y Y), láminas planas y delgadas de materiales comunes, por lo general planchas metálicas en diversos calibres. En este tipo de maquinaria, como se observa en la figura 1-17, puede desplazarse el cabezal, la cama de corte (superficie donde se apoya la lámina a cortar) o los dos, lo cual acelera el proceso. Sin embargo, en

esta modalidad, el cabezal no gira en ninguna dirección y por lo tanto no puede realizar cortes en ángulos diferentes al eje perpendicular al plano de la lámina.

**Figura 1-17:** Maquinaria CNC bidimensional.

A. Cortadora de láser. B. Cortadora de arco de plasma.



Fuentes: A. [www.emc4i.com](http://www.emc4i.com) – B. [www.bsginc.ca](http://www.bsginc.ca)

Por su parte, la fabricación sustractiva implica el desprendimiento de partículas de material, a través de un esfuerzo mecánico como en el caso de las *ruteadoras* o fresadoras o por erosión del material, como en el *water-jet*. El corte o grabado de la superficie puede ser restringido de forma axial, superficial o volumétrica.

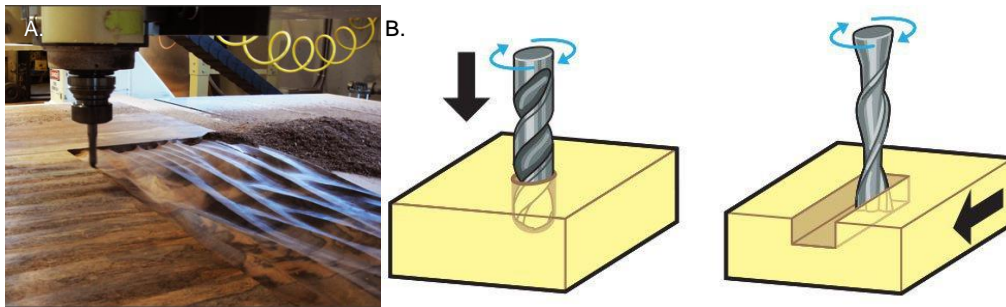
En el caso de las ruteadoras ocurre mediante un cabezal con una fresa a altas revoluciones (ver diferencias con una broca común de taladro en la figura 1-18). En el segundo caso, se trata de un fino chorro de agua con partículas abrasivas disparado a muy alta presión a través de una boquilla diminuta. El rango cinemático de esta maquinaria abarca desde los 3 a los 5 ejes, lo que permite realizar cortes en ángulos variados respecto al eje perpendicular al plano de la lámina, así como también procesar láminas de calibres mayores que la modalidad bidimensional.

Los materiales más comúnmente procesados incluyen maderas, aglomerados de madera, plásticos, materiales compuestos e inclusive en algunos casos, vidrio. Las formas de las piezas a cortar, independientemente de la irregularidad de su geometría, son acomodadas y organizadas automáticamente dentro del tamaño de la lámina mediante un software (procedimiento conocido como *nesting*), optimizando así el tiempo de corte y el uso del material, lo que se traduce en reducción de desperdicios.

En el campo de la manufactura para la construcción, la industria metalmeccánica es la que tradicionalmente se ha encargado de llevar a cabo este tipo de procedimientos en los materiales metálicos, para la producción de componentes constructivos a través de herramientas como el troquel, el cual permite operaciones estandarizadas como cizallado, doblado, corte de sobrantes, picado, perforado, estampado, embutido, marcado o rasurado, u otras herramientas-máquina que dan forma a las piezas por arranque de viruta, estampado, corte o electroerosión. En materiales diferentes al metal, los procesamientos de corte o grabado se han realizado tradicionalmente de forma manual con tornos, sierras y herramienta menor o de carpintería. Como aporte de la maquinaria de fabricación de corte y sustracción a este tipo de procesamiento de material, se encuentran, el mejoramiento de la velocidad, la precisión, la posibilidad de operaciones no estandarizadas (no repetitivas) y un aprovechamiento optimizado de los materiales en comparación con técnicas manuales tradicionales.

**Figura 1-18:** Maquinaria cnc de fabricación sustractiva.

A. Ruteadora o fresadora cnc tallando una superficie de madera. B Diferencias entre una broca convencional de taladro y una fresa. Mientras la primera solamente puede perforar unidireccionalmente el material, la segunda puede además realizar cortes lateralmente y a diferentes profundidades dentro de la superficie de material.



Fuentes: A. <http://www.pistolamfg.com>. – B. <http://makezine.com>

### 1.5.2 Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como **prototipado rápido**, se refiere a la utilización de maquinaria que adiciona material mediante la aglomeración o adhesión vertical de capas de manera controlada, para producir una forma volumétrica determinada, **sin la ayuda de moldes o encofrados**. En algunos casos específicos y técnicas con este tipo de fabricación, se utiliza un material distinto como estructura de

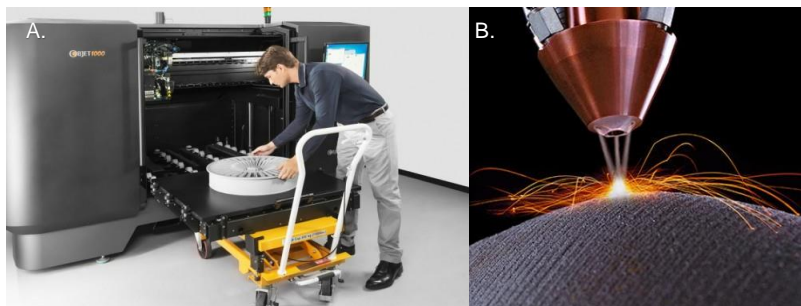
soporte del objeto a fabricar (como por ejemplo la técnica de cera perdida en la joyería). El procedimiento en líneas generales, **consiste en la subdivisión del objeto a producir en secciones bidimensionales horizontales a partir de un modelo 3d del mismo**, que se traducen en información interpretable por la máquina, para dirigir las trayectorias del cabezal de la misma. Durante ese recorrido se deposita el material selectivamente y el mismo se solidifica capa tras capa.

Una serie de variaciones de la tecnología original patentada en 1986 por Charles Hull, conocida como *Estereolitografía (SL o SLA por Stereolithography en inglés)*, ha hecho su aparición en el mercado. Principalmente se diferencian en el proceso de solidificación (curado) del material que puede ser mediante luz ultravioleta, calor o químicamente.

En la estereolitografía, un fotopolímero líquido (polímero que tiene una reacción al contacto con la luz), se solidifica al ser expuesto a un haz de láser, que dibuja sobre su superficie en múltiples pasos, la respectiva forma de la capa bidimensional del objeto a crear. Otro método similar, es el *Sinterizado Selectivo Láser (o SLS por sus siglas en inglés)*, el cual permite la creación de objetos a partir de la solidificación de partículas de poliamida pulverizada, pero también empleado en la actualidad, en la fabricación de láminas minerales monolíticas. Del mismo modo ocurre con el *Sinterizado Láser Directo en Metal (DMLS por sus siglas en inglés)* en el cual se solidifican partículas de aleaciones de bronce, acero, acero inoxidable y cromo cobalto (Dunn, 2012). Estas dos modalidades pueden observarse en la figura 1-19.

**Figura 1-19:** Maquinaria de fabricación aditiva.

(De izquierda a derecha). A. Impresora profesional tipo SLA de alta calidad. B. Boquilla de una impresora tipo DMLS disparando partículas de metal siendo solidificadas por un haz de láser.



Fuentes: A. [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com) – B. [www.mundomaker.com](http://www.mundomaker.com)

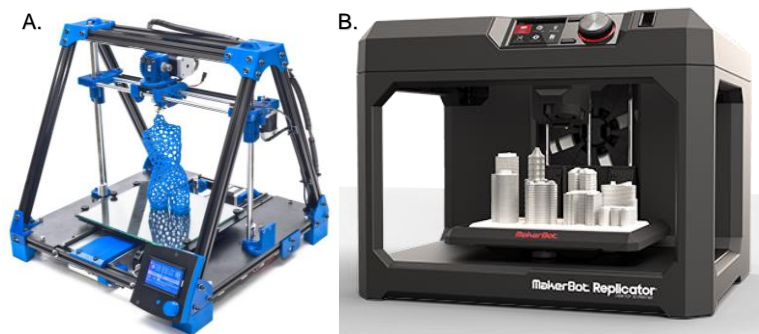
Aun cuando la estereolitografía y el sinterizado han sido las primeras modalidades en esta tecnología, tal vez la modalidad más ampliamente conocida en la actualidad es la *Impresión 3D* (*3DP* por sus siglas en inglés). Esto se debe a una amplia estrategia de difusión para su masificación como tecnología de código abierto y como resultado de la relativamente reciente expiración de su patente original. Esta modalidad inicialmente se refería a la solidificación de un material cerámico pulverizado, bajo la misma técnica de estratificación de objetos tridimensionales. Sin embargo, a esta modalidad también le han surgido variantes, principalmente con respecto a los materiales empleados. Por ejemplo, la *Manufactura de Objetos Laminados* (*LOM* por sus siglas en inglés) consiste en un proceso en el cual superficies de papel, plástico o metal en hojas o rollo, son cortadas por un láser con la forma de cada capa del objeto, invirtiendo el haz mediante un espejo. Posteriormente son adheridas o laminadas, conformando el objeto.

Pero tal vez la variante más visible de la impresión 3d actualmente, es la *Deposición de Material Fundido* (*Fused Deposition Modelling* o *FDM* por sus siglas en inglés) que se observa en la figura 1-20. En esta, la impresora calienta un filamento de un polímero termoplástico hasta su punto de plasticidad y el cabezal lo deposita sobre una superficie de trabajo. Las trayectorias, que pueden ser ejecutadas por el cabezal o por la superficie, confieren la forma según la respectiva capa del objeto en cada paso. El material se solidifica con su nueva forma una vez se enfría. El calibre de las capas puede ser modificado y entre más fino sea, la superficie del objeto tendrá mayor calidad (resolución). Otra modalidad muy similar, es la *Manufactura Multi-Jet* (*MMJ* por sus siglas en inglés), que emplea una cera termoplástica depositada en capas muy finas, que se solidifica mediante luz ultravioleta.

**Figura 1-20:** Impresoras 3d de escritorio del sistema FDM.

A. Impresora 3d proyecto RepRap el cual busca masificar la impresión 3d mediante un diseño de impresora de código abierto capaz de replicar una parte de sus propios componentes. B. Impresora comercial Makerbot Replicator.





Fuentes: A. <https://reprapbcn.wordpress.com> – B. <http://store.makerbot.com>.

Teniendo en cuenta la gran velocidad con la que se ha desarrollado esta maquinaria e implementado en múltiples industrias (biomecánica, medicina, militar, ingeniería de producto, odontología, entre otras) durante la última década, a pesar de que su invención fue aproximadamente hace treinta años, aún requiere un mayor desarrollo en sus aplicaciones para la construcción. De acuerdo con Paoletti y Tardini (2011), el tamaño de las piezas fabricadas, la baja velocidad y los altos costos de la maquinaria son algunas de las limitaciones. De ahí que, por ahora, esta tecnología sea empleada principalmente en tareas de prototipado de piezas pequeñas. Por ejemplo, ya empieza a masificarse su uso en la elaboración de maquetas.

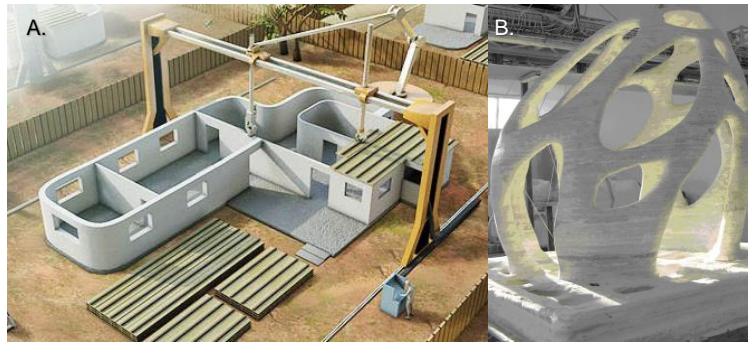
Aun así, ya se encuentran tanto a nivel investigativo como aplicado, avances en esta modalidad de fabricación para su implementación en la industria de la construcción. En lo investigativo se estudian diversas escalas, desde pequeños componentes hasta la edificación en su totalidad. Por ejemplo, el ingeniero Behrokh Khoshnevis de la Universidad de California, patentó un sistema de impresión a gran escala conocido como *Contour Crafting*, orientado a producir tanto estructuras como sub-componentes. Igualmente, el ingeniero Enrico Dini ha creado el sistema de impresión *D-Shape*, el cual emplea arena y un aglutinante inorgánico para producir estructuras con una composición y comportamiento similar al de la piedra, sobre el cual además se afirma, que no requiere de intervención humana durante el proceso. Estas propuestas se pueden observar en la figura 1-21.

Otra investigación que reúne a diversos actores tanto de la academia como de grandes compañías de la industria de la construcción a nivel internacional (Loughborough University, Foster + partners, Buro Happold, Hyundai Construction, Putzmeister, Helm X,

Saint Gobain) bajo el nombre Freeform Construction Team, desarrollan un sistema orientado a la manufactura de componentes arquitectónicos de forma libre y geometría compleja en concreto, con novedosas técnicas de refuerzo, que se observa en la figura 1-22.

**Figura 1-21:** Sistemas de fabricación aditiva de gran tamaño.

A. Concepto del sistema Contour Crafting en la construcción de una vivienda. B. Prototipo impreso mediante el sistema D-Shape del kiosko Radiolaria diseñado por el arquitecto Andrea Morgante.



Fuentes: A. [www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org) – B. [www.press.d-shape.com](http://www.press.d-shape.com)

Paralelamente, la compañía china Winsun Decoration Design Engineering, ideó un sistema de impresión 3d de concreto (ver figura 1-22), con el cual ha logrado fabricar casas de un piso de aproximadamente 200 m<sup>2</sup> a una gran velocidad (hasta 10 unidades en 24 horas), e incluso un edificio de apartamentos de 6 pisos. Los prototipos consisten en un sistema de elementos auto-portantes. El proceso de manufactura involucró la utilización de material de construcción reciclado para reducir los costos.

**Figura 1-22:** Prototipos impresos con sistemas de gran tamaño.

A. Prototipo realizado con el sistema del Freeform Construction Team. B. Prototipos de componentes plásticos e impresora KameMaker. C. Proceso de impresión de concreto. D. Izaje en sitio de componentes terminados, por la compañía Winsun.



Fuentes: A. [www.freeformconstruction.com](http://www.freeformconstruction.com) – B. [www.bouwendnederland.nl](http://www.bouwendnederland.nl) – C. y D. [ww.3ders.org](http://ww.3ders.org)

---

En otras experimentaciones de aplicaciones constructivas, se encuentra el proyecto 3D Canal House del estudio arquitectónico holandés DUS Architects. Actualmente en desarrollo, el proyecto consiste en crear una reinterpretación de la vivienda tradicional holandesa (la casa de canal), en donde se busca plantear una reflexión sobre cómo esta tecnología impacta la actividad arquitectónica, urbana y constructiva. Para ello, se emplea un tipo de impresora 3d de gran formato (en comparación a las de escritorio), conocida como *KamerMaker* (ver figura 1-22), con la que se fabrican y ponen a prueba prototipos de elementos ensamblables para el sistema constructivo propuesto, generado mediante modelado paramétrico y en el que se emplea un material 80% bioplástico en su composición.

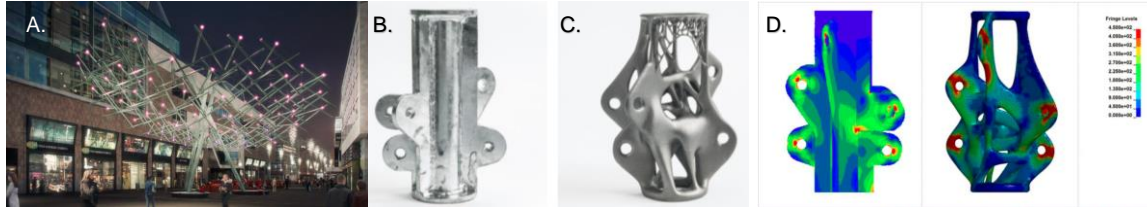
Otro avance investigativo significativo, y con repercusiones potenciales en la construcción a partir del diseño computacional, es el presentado por la ingeniera Salomé Galjaard de la compañía de ingeniería Arup and Partners, que se observa en la figura 1-23. A partir del desarrollo de un conjunto de nodos para una estructura de forma irregular en el sistema estructural tensegrity, en la cual las conexiones de los tensores a los nodos se generaban siempre en ángulos diferentes, implicaba la producción de cientos de nodos diferentes de forma manual. El proceso de diseño de estos elementos, se realizó mediante programas de modelado paramétrico para establecer las variables de diseño y fabricación, además con el fin de realizar simulaciones de comportamiento estructural y material, empleando análisis de elementos finitos y optimización topológica para lograr una distribución óptima del material en cada pieza, mejorando su desempeño y reduciendo también su peso. Al final, esto permitió producir automáticamente los modelos tridimensionales para su manufactura mediante el método Direct Metal Laser Sintering, que en este caso se realizó directamente en acero martensítico<sup>18</sup> (Galjaard, Hofman y Ren, 2014).

---

<sup>18</sup> Acero inoxidable aleado con cromo y otros elementos, cuya resistencia mecánica y a la corrosión son mayores que las del acero convencional.

**Figura 1-23:** Diseño computacional y fabricación aditiva con materiales metálicos.

A. Estructura tensegrity. B. Prototipo nodo tradicional por corte y soldadura. C. Prototipo de nodo por manufactura aditiva. D. Gráficas comparativas de simulación de esfuerzos de Von Mises en MPa, donde las mayores y menores áreas de esfuerzos se indican colores rojo y azul respectivamente.

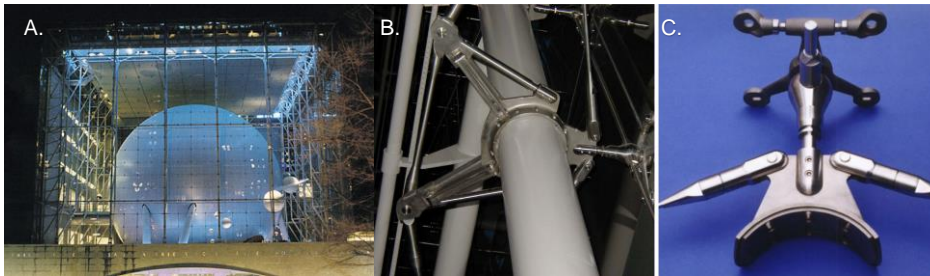


Fuente: Galjaard, Hofman y Ren, 2014.

Por otra parte, usos más convencionales de la manufactura aditiva en la construcción, ya se han empleado en el prototipado de uniones para sistemas de anclaje de fachadas flotantes, como la del planetario del Rose Center for Earth and Space en Nueva York, diseño de la oficina Polshek and Partners, que se observa en la figura 1-24. La compañía TriPyramid, especialista en este tipo de sistemas constructivos, desarrolló los componentes en este caso.

**Figura 1-24:** Moldes negativos por fabricación aditiva para fundición de piezas de acero.

A. Fachada flotante en el planetario del Rose Center. - B y C. Sistema de sujeción del vidrio (arañas) desarrollado por la compañía “TriPyramid”. La pieza fue prototipada mediante impresión 3d y llevada a producción mediante fundición en molde negativo por vaciado invertido.



Fuente: [www.tripyramid.com](http://www.tripyramid.com)

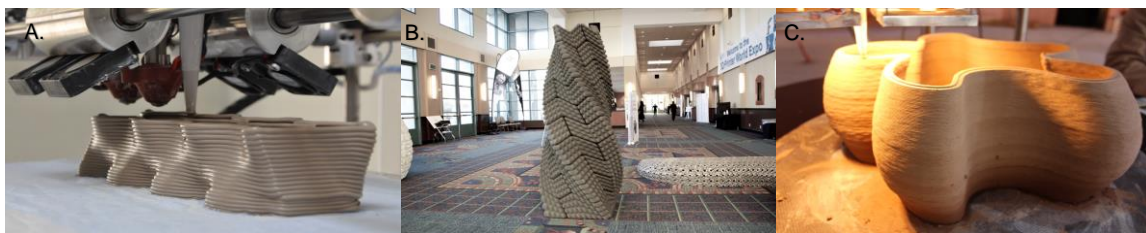
En adición a lo anterior, otras investigaciones en la ciencia de materiales demuestran que además de los polímeros o las aleaciones de metales, otros materiales tales como la cerámica (Eckel, et. al, 2015) o el vidrio (Klein, et. al., 2015), son susceptibles de ser modificados por procesos de alta tecnología para su uso en fabricación aditiva. Pero

también investigaciones menos sofisticadas, realizadas principalmente por arquitectos, como se puede apreciar se la figura 1-25, exploran el uso de materiales como tierra y arcilla en la fabricación aditiva, materiales abundantes y de uso ancestral en la construcción.

Con esto se busca expandir los límites conocidos de los usos de estos materiales, así como también contribuir al desarrollo tecnológico de técnicas constructivas tradicionales para la construcción de vivienda en contextos tales como los países en desarrollo. Sin embargo, por ahora, estas búsquedas se concentran en el perfeccionamiento de esos materiales y la maquinaria (principalmente en pruebas con aditivos y aglutinantes, aumento del tamaño, velocidad de fabricación, reducción de costos e impactos ambientales y mejoramiento de boquillas extrusoras para materiales densos). Y por la misma vía, se investigan también con propósitos convergentes, materiales no convencionales como la sal, la arena y otros orgánicos como el té con polímeros cementicios e incluso el reciclaje del caucho de las llantas de los automóviles.

**Figura 1-25:** Fabricación aditiva con materiales tradicionales y alternativos.

A. Impresora 3d de escritorio modificada para producir ladrillos de arcilla de geometrías complejas del proyecto Building Bytes. B. “Quake Column” prototipo de columna de resistencia sísmica ensamblada a partir de módulos impresos en arena, cuya forma se basa en la construcción inca de sillares. C. Prueba de impresión con tierra en el proyecto WASP.



Fuente: A. [www.buildingbytes.info](http://www.buildingbytes.info) – B. [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com) – C. [www.3ders.org](http://www.3ders.org)

Con base en estos ejemplos, la manufactura aditiva demuestra poseer un enorme potencial como factor de innovación dentro de la industria de la construcción. No solo en cuanto a procesos y procedimientos que la aceleren y hagan más eficiente, sino además por el **gran impacto que puede tener en aspectos como el económico y el ambiental, mediante la reducción de desperdicios y el reciclaje de materiales**. Lo anterior, se traduce en modos de hacer que buscan obtener una baja huella de carbono,

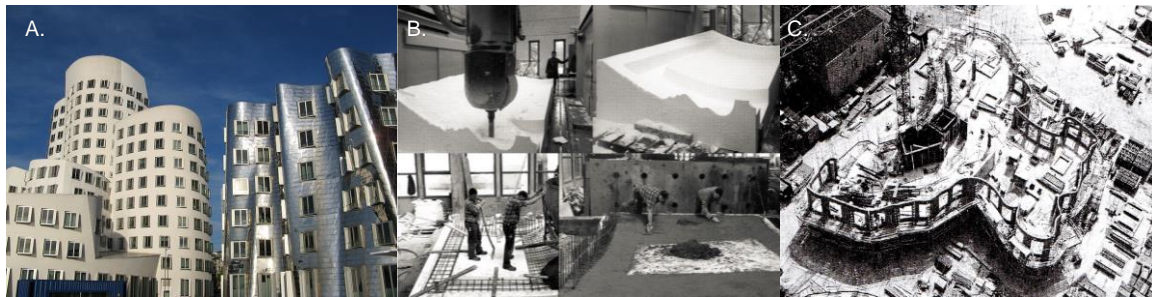
meta de un compromiso de responsabilidad social y ecológica que vale la pena observar como importante aprendizaje.

### 1.5.3 Fabricación formativa

Esta modalidad de la fabricación digital, tiene tres variantes. La primera, se apoya en la maquinaria de fabricación sustractiva, para la elaboración de moldes con el fin de realizar vertimientos o vaciados de materiales en estado fluido (por ejemplo, concreto u otro tipo de materiales compuestos). La segunda, consiste en procedimientos de condicionamiento de un material para adoptar una forma determinada de manera permanente, mediante de la aplicación axial o superficial de fuerzas mecánicas (tensión o compresión), calor o vapor. Ejemplos de la primera variante se observan en las figuras 1-26 y 1-27 y de la segunda en la figura 1-28.

**Figura 1-26:** Ejemplo de la primera variante de fabricación formativa.

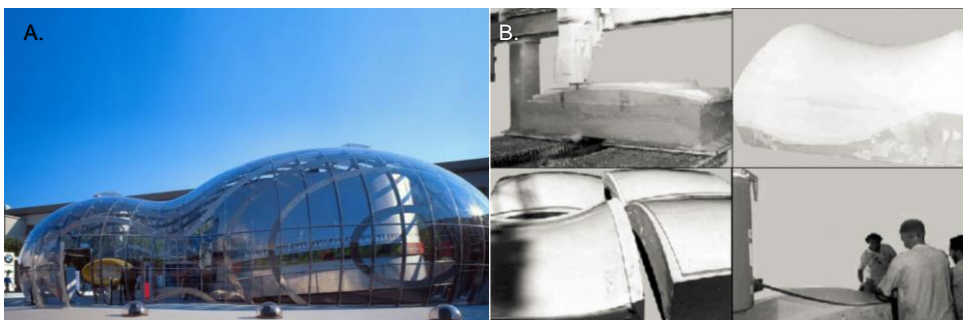
A. Complejo Neuer Zollhof en Düsseldorf, Alemania en 1999 por el arquitecto Frank Gehry. B. Proceso de ruteado cnc de 355 moldes diferentes en de espuma de poliestireno expandido para elementos de fachada, para el posterior vaciado de concreto. C. Proceso de montaje de los paneles de concreto en la obra.



Fuentes: A. <https://upload.wikimedia.org> – B. y C. (Kolarevic, 2003).

**Figura 1-27:** Otro ejemplo de la primera variante de la fabricación formativa.

A. pabellón Bubble para la BMW diseñado por el arquitecto Bernard Franken, en Alemania. B. Proceso de ruteado CNC de moldes para termoformado de paneles de acrílico.

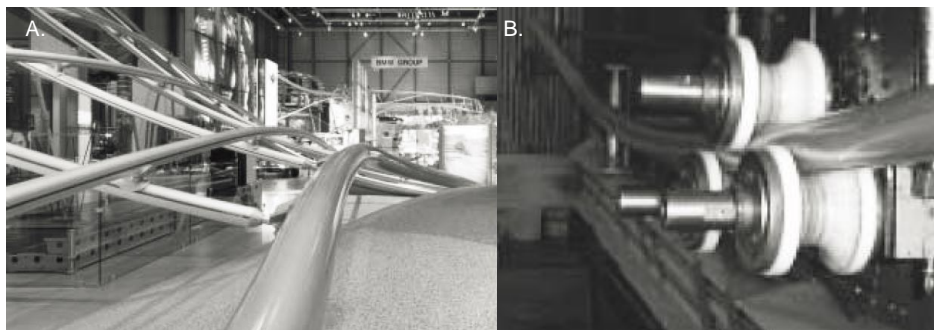


Fuente: (Kolarevic, 2003).

En esta variante, los esfuerzos aplicados llevan al material de acuerdo a sus propiedades físicas, más allá de su límite elástico. Materiales como el acero inoxidable, el aluminio, el níquel y el titanio son los más comunes en estos procesos. Dobladoras, rodillos y pines de altura ajustable, todos controlados numéricamente por computador, son en líneas generales, el tipo de maquinaria que conforma este grupo.

**Figura 1-28:** Ejemplo de la segunda variante de la fabricación formativa.

A. Estructura del pabellón Brandscape de la BMW, diseñado por Franken. B. Se emplearon perfiles tubulares de aluminio que fueron curvados mediante una dobladora CNC.



Fuente: (Kolarevic, 2003).

La tercera variante, el formado por explosión, se basa de cierto modo en las dos variantes anteriores, pero es mucho menos empleada en la construcción por ser todavía más especializada, sus procedimientos y resultados se aprecian en las figuras 1-29 y 1-30. Consiste en la aplicación de fuerzas mediante explosiones controladas dirigidas

contra el material, convencionalmente una lámina metálica, para que este adquiriera la forma de un molde negativo con la geometría deseada. La primera técnica que se desarrolló, era conocida como explosión directa, que como su nombre lo indica, consistía en poner una carga explosiva contra la lámina, y está a su vez en dirección al molde, técnica que ya fue descontinuada dado el alto riesgo de errores de producción. La técnica actual en esta modalidad es la explosión indirecta, en donde la detonación ocurre dentro de un tanque con un líquido (normalmente agua), el cual es sellado, y el volumen de aire que queda entre la lámina y el molde, es extraído dejando ese espacio al vacío, con lo que se asegura la correcta alineación entre lámina y molde (Menges, 2006; Materia, 2007).

Normalmente, esta modalidad de fabricación se emplea en la producción de piezas con superficies de doble curvatura gemela (es decir, las dos curvas generatrices son positivas o negativas), pero también otras aplicaciones como relieves estampados han sido realizadas. Su uso principal ha sido en la industria aeroespacial y aeronáutica. Si bien con este método se pueden fabricar piezas de gran tamaño (hasta de 10 m) y grosor (hasta 6 cm), no es un sistema fácilmente disponible<sup>19</sup>, puesto que implica muy altos costos y su control a través del computador solo ocurre en el proceso complementario de la fabricación de los moldes.

No obstante, este sistema resulta más económico comparado con otros de transformación de lámina metálica para la obtención de superficies homogéneas de geometría compleja, como, por ejemplo, el troquelado de embutido profundo (conocido como *deep drawing* en inglés), que como en todas las modalidades de troquelado, los costos de producción se equilibran al tratarse de fabricación masiva en serie de piezas o componentes (Materia, 2007).

---

<sup>19</sup> Solo se tiene conocimiento de empresas especializadas en Holanda, tales como 3D-Metal Forming B.V. (antes Exploform) y Octatube, que han logrado adaptar los procedimientos de esta modalidad de fabricación a una producción económicamente viable para la construcción (Menges, 2006).



**Figura 1-29:** Proceso de fabricación formativa por explosión.

(De izquierda a derecha) A. Procedimiento de explosión controlada. B. Moldes negativos en GFRC, formados mediante ruteado cnc de moldes positivos de poliestireno. C. Panel de aluminio de doble curvatura gemela, con bordes soldados.



Fuente: (Menges, 2006).

**Figura 1-30:** Ejemplo de formado por explosión.

(De izquierda a derecha) A. Pabellón Hydra Pier en Haarlemmermeer, Holanda por Asymptote Architecture. B. Detalle del revestimiento de cubierta en láminas de aluminio de 3mm de espesor. C. Prueba de ensamble de los paneles.



Fuentes: A. y B. [www.archello.com](http://www.archello.com).- C. (Menges, 2006).

En general, los métodos que usa la fabricación formativa son interesantes para la construcción, porque demuestran la capacidad de innovación tecnológica de la industria, para llevar a cabo procesos complejos y desafiantes con resultados exitosos. No obstante, estos procesos aún requieren mayor desarrollo dada la generación de desperdicios que implican, especialmente en la primera modalidad vista (Paoletti y Tardini, 2011).

### 1.5.4 Fabricación robótica

El principio funcional de esta tecnología es el mismo que en los grupos vistos anteriormente, el control numérico computarizado. Por lo tanto, el computador es el soporte de la información que la controla. A diferencia del resto de la maquinaria CNC, la tecnología robótica es mucho más flexible, pudiendo tener tantas aplicaciones como

herramientas y accesorios se le puedan acoplar. No obstante, cada fabricante de brazos robóticos produce su propio código para controlar sus equipos, lo que añade un grado de dificultad y especialización al trabajo con este tipo de herramientas.

De acuerdo con la definición técnica del concepto de brazo robótico manipulador,<sup>20</sup> los orígenes del mismo se remontan a los años treinta. El prototipo conocido por ese entonces como *grúa* era capaz de apilar bloques de madera a partir de patrones pre-programados, sin embargo, la primera patente solicitada para un robot no se registró sino hasta 1954 (y fue otorgada en 1961), por George Devol. La evolución de estos dispositivos se aceleró notablemente durante las décadas de los años sesenta y setenta, estableciéndose con fuerza en la industria automotriz de los países industrializados, para ser transferidos posteriormente a industrias como la construcción.

Inicialmente en esa última década en Japón, compañías como Sekisui House, Toyota Home y Panasonic Home, provenientes de otros sectores manufactureros donde ya habían aplicado la automatización, intentaban hacer lo mismo con la mayoría de los procesos fuera de la obra, pero bajo supervisión humana, lo cual funcionaba más como una línea de montaje que como verdadera automatización de procesos (Bock y Langenberg, 2014). Más tarde, en los años ochenta diversas compañías japonesas desarrollaron equipos robotizados, algunos de los cuales se pueden ver en la figura 1-31, con el objetivo de reducir riesgos para el personal y automatizar procesos en sitio, los cuales llegaron a ser parte importante del desarrollo constructivo de algunas edificaciones en ese país, con impactos importantes en temas como seguridad industrial y gestión de calidad. No obstante, por la naturaleza diversa de las tareas de la construcción, no fue posible realizar dispositivos capaces de atender una amplia variedad de esas tareas.

Ese fue el caso de sistemas como el *SMART* (Shimizu Manufacturing system for Advanced Robotics Technology), empleado para el izaje y soldadura de elementos estructurales en la construcción del edificio del banco Juroku en Nagoya, Japón. Otros

---

<sup>20</sup> Según la norma ISO 8373:1994 I. Robots industriales manipuladores – Vocabulario, el robot industrial ha sido definido como un dispositivo manipulador de tres o más ejes, multipropósito, controlado automáticamente y reprogramable.

equipos incluyeron al Shimizu Mighty Jack, usado para el posicionamiento de vigas de acero, el Robot Organizador de Barras de Refuerzo de Kajima, el Colocador de Concreto Obayashi-Gumi, la Máquina Auto-escaladora de Inspección de Takenaka, el Robot para Aplicación de Pintura de Pilares de Taisei o el Robot Spray de Aislante de Shimizu (Mitchell y McCulough, 1995; Koralevic, 2003).

**Figura 1-31:** Primeras aplicaciones de robótica en obra.

(De izquierda a derecha) A. Robot con riel guía para pintado de fachadas de la Taisei Corporation, 1988. - B. Robot para acabado de concreto de la Shimizu Corporation, 1987. C. Robot para inspección de fachadas de la Kajima Corporation, 1988.



Fuente: (Bock y Langenberg, 2014).

Debido a sus altos costos, esta tecnología no llegó a difundirse globalmente, sin embargo, esto no ha sido impedimento para que dejara de ser investigada. **Hoy en día, el brazo robótico industrial multipropósito es, en sí mismo, un objeto de investigación en la arquitectura y la construcción.** Por su amplio rango de capacidades que permite explorar complejos procesos de manufactura avanzada, dentro y fuera de la academia. Dicha investigación se focaliza principalmente en dos áreas: el efector, que se refiere a los dispositivos específicos que se le pueden adaptar al brazo robótico para diversas modalidades de fabricación, y los sensores, para producir nuevos tipos de comportamientos (Universidade do Porto, 2014), elementos que se pueden observar en la figura 1-32.

Esta maquinaria que es capaz de ejecutar casi cualquier proceso de manufactura, ya sea de corte bidimensional, sustractivo, aditivo o formativo, ha permitido estudiar una diversidad de materiales que van desde la madera y el metal hasta materiales como el concreto y compuestos (fibras de vidrio y carbono con resina epóxica), entre otros. Inclusive se han explorado otros procesos como el posicionamiento o agregación de

partículas, por ejemplo, la colocación de unidades de mampostería o la agregación de piezas con geometrías irregulares.

Su flexibilidad radica en que admiten fácilmente, diversas configuraciones colaborativas en combinación con equipos similares o complementarios (ver figura 32), además de tener un mayor tamaño, un rango cinemático de 6 ejes y no estar necesariamente vinculadas a superficies de trabajo, lo que permite configurar procesos de manufactura de acuerdo a las necesidades.

**Figura 1-32:** Complementos acoplables a un brazo robótico.

A. Riel que permite expandir el alcance y espacio de trabajo del robot. B. Tornamesa que pertenece a un conjunto mayor de dispositivos llamados posicionadores usados para ubicar el material en posiciones determinadas mientras el robot trabaja en el mismo. C. Huso (spindle) es una herramienta usada para ruteado, perforado, desbastado o pulido. D. Asa (gripper) es una herramienta usada para sujetar objetos. E. Efecto de extremo (end-effector), es una herramienta diseñada a medida para una tarea específica, de ahí la gran flexibilidad de esta tecnología.



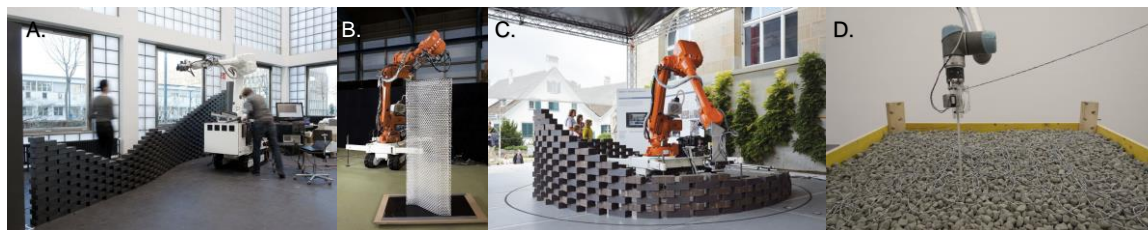
Fuente: (Universidade do Porto, 2014).

Actualmente en múltiples escuelas de arquitectura principalmente en Europa, Norte América y Asia (y en medida mucho menor, en algunos países de Latinoamérica como se verá en casos puntuales en el siguiente capítulo), mediante colaboraciones interdisciplinarias y soporte de las compañías fabricantes de estos equipos, se estudian potenciales escenarios de aplicación en el diseño y la construcción. Allí, se realizan experimentos que abarcan desde procesos constructivos convencionales para mejorar su eficiencia, hasta exploraciones sobre los límites de las capacidades de estos sistemas para la manufactura de componentes arquitectónicos, sistemas estructurales, constructivos y construcción en sitio, lo que ha permitido proponer nuevos enfoques en la creación de la forma arquitectónica, procesos y recursos constructivos.

Aunque ya se cuentan varias escuelas embarcadas en este propósito, algunas de las investigaciones más destacadas, son las realizadas recientemente por el grupo de Arquitectura y Fabricación Digital del Instituto de Tecnología en Arquitectura (ITA) de la ETH en Zurich, Suiza a cargo de los arquitectos Fabio Gramazio y Matthias Kohler, algunos de las cuales se observan en la figura 1-33. Allí se abordan a través de ejercicios prácticos como prototipos a escala real, temas como estructuras livianas, estrategias para construcción robótica en sitio, estructuras complejas en madera, cortes espaciales con alambre caliente, moldeado de mallas, procesos de automatización para la instalación de mosaicos (enchapes), composiciones complejas con elementos de mampostería, estructuras por abarrotamiento de materiales irregulares (agregados), ensambles arquitectónicos mediante dispositivos voladores (cuadrocópteros, comúnmente conocidos como drones), entre otros.

**Figura 1-33:** Algunos prototipos desarrollados en las investigaciones del ETHZ.

A. On-Site robotics construction. B. Mesh Mould. C. The endless Wall. 4. Rock Print.



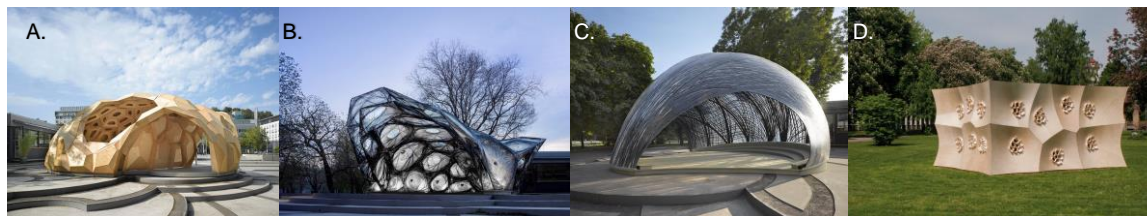
Fuente: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch>

Del mismo modo, el trabajo colaborativo entre los Institutos de Diseño Computacional (ICD) y de Construcción de Estructuras y Diseño Estructural (ITKE) de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Stuttgart en Alemania, dirigidos por el arquitecto Achim Menges y el ingeniero Jan Knippers respectivamente, han venido fabricando y construyendo una serie de pabellones también a escala real, con el fin de poner a prueba nuevos conceptos abordados en múltiples líneas de investigación, algunos de los cuales se pueden apreciar en la figura 1-34. Dentro de estos se encuentran: computación material y biomimética (descritos anteriormente), en los que se analiza principalmente el papel de fabricación robótica en la relación a la construcción de estructuras no convencionales y livianas, materiales compuestos y su desempeño estructural y/o de reacción a condiciones ambientales, procesos productivos mediante configuraciones colaborativas entre los mismos brazos robóticos y otros dispositivos complementarios, y

procesos computacionales morfogenéticos a partir de análisis de características funcionales extraídas y abstraídas de modelos de rol biológicos, como por ejemplo configuraciones materiales o estructurales.

**Figura 1-34:** Pabellones desarrollados en la Universidad de Stuttgart.

A. Pabellón 2011, placas dentadas del erizo de mar. B. Pabellón 2013-14, Fibras del caparazón del escarabajo *elytra*. C. Pabellón 2014-15, burbuja telaraña de la araña de agua. D. Pabellón HygroSkin metereosensitive.



Fuente: <http://icd.uni-stuttgart.de>

Por otra parte, ya en su aplicación como maquinaria para procesos constructivos convencionales en obra, se cuentan empresas que han desarrollado unidades robóticas para mampostería (ver figura 1-35 A y B), así como otros desarrollos más especulativos que se basan en fabricación aditiva con arcilla (ver figura 35-3 C). Pero en adición a estas y en respuesta a las necesidades crecientes de medios y métodos de construcción de formas complejas y no estandarizadas mediante prefabricación, ya existen proyectos - aunque muy pocos aún- que han empleado estas tecnologías en la producción de componentes y estructuras.

**Figura 1-35:** Procesos constructivos tradicionales con fabricación robótica en obra y con arcilla.

(De izquierda a derecha) A. Semi-Automated Mason, este robot conforma un equipo con el trabajador, en donde el primero mide los ladrillos, aplica el mortero de pega y sienta las hiladas y el segundo, se encarga de sentar piezas complicadas como esquinas y de detalles estéticos como la limpieza del mortero. B. Unidad robótica “Hadrian” para el mismo propósito con un rendimiento de 1000 ladrillos por hora. C. Columna modelada paramétricamente siendo impresa en arcilla por un brazo robótico parte del proyecto de investigación FabClay.



Fuentes: A. [www.construction-robotics.com](http://www.construction-robotics.com) -B. [www.fbr.com.au](http://www.fbr.com.au) - C. [www.fabbots.wordpress.com](http://www.fabbots.wordpress.com)

Ese es el caso de arquitectos como Gramazio y Kohler, mencionados anteriormente, quienes han desarrollado proyectos que han permitido demostrar y poner en práctica procesos experimentales de producción gestados desde la academia. La creación y modificación de fachadas en ladrillo como las de los viñedos Gantenbein o de la fábrica ladrillera Keller AG y otros materiales, como la de la Corte Federal de Bellinzona, que se pueden observar en la figura 1-36, son prueba de ello.

**Figura 1-36:** Fabricación robótica con mampostería en proyectos ejecutados.

(De izquierda a derecha) A. Fachada de la bodega de los viñedos Gantenbein en Fläsch, Suiza. Un muro compuesto por módulos prefabricados de mampostería con aparejos variables crea una superficie horadada que permite el paso controlado de luz y ventilación natural, y a su vez generan un patrón gráfico. B. Modificación de la fachada de la ladrillera Keller AG en Pfungen, Suiza. C. Revestimiento interior de la sala central de la corte federal de Bellinzona, Suiza. - D. Detalle del revestimiento.



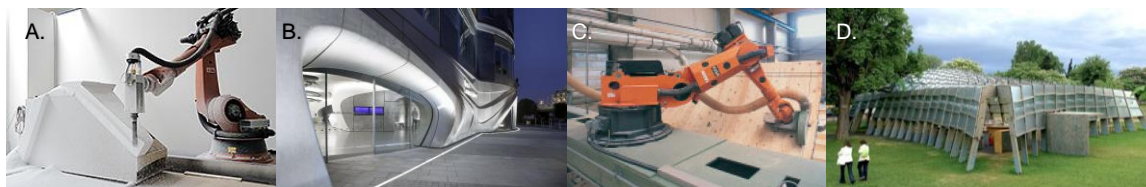
Fuente: <http://www.gramaziokohler.com/>

Asimismo, una reducida cantidad de empresas del sector han empezado a adaptar sus procesos productivos a estas herramientas y también otras de consultoría en fabricación robótica para la construcción, han venido surgiendo en el periodo de los últimos ocho años en países de Norteamérica y Europa. Estas pequeñas empresas hasta ahora operan en el terreno de la investigación y desarrollo (I+D), con contribuciones muy puntuales en proyectos, específicamente y como ya se observó, en el desarrollo de

componentes de mampostería, pero también en la manufactura de moldes negativos en poliestireno para la elaboración de elementos de revestimiento o para estructuras (temporales y permanentes) compuestas por arcos o paneles de madera laminada, en donde el desarrollo de sistemas de ensamble y uniones son aspectos claves en los procesos constructivos, como se observa en la figura 1-37.

**Figura 1-37:** Fabricación robótica aplicada en procesos sustractivos y de corte.

A. Tallado de bloques de poliestireno para producción de 400 piezas de moldes para revestimiento. B. Roca Gallery, Londres, Zaha Hadid Architects. Paneles de GRC en fachada e interiores elaborados con moldes tallados. C. Corte de arcos de madera laminada. D. Pabellón temporal galería Serpentine 2005, Londres, ensamblado en sitio, diseño de Álvaro Siza y Eduardo Soto de Moura.



Fuentes: A. [www.kuka-robotics.com](http://www.kuka-robotics.com) - B. [www.zahahadidarchitects.com](http://www.zahahadidarchitects.com) - C. (Menges, 2006) - D. [www.alvarosizavieira.com](http://www.alvarosizavieira.com)

En resumen, se puede afirmar que, de todas las modalidades de la fabricación digital vistas, la robótica es la de mayor potencial para transformar la industria de la construcción. Aun cuando la maquinaria de fabricación bidimensional y sustractiva es la de más amplio uso en la producción de componentes para la construcción en la actualidad a nivel global, la aditiva tiene un alto impacto en cuanto a beneficios ambientales y económicos y la formativa, demuestra que cada vez hay menos retos para la manufactura. Esto no es debido solamente a su gran flexibilidad y precisión, sino además porque puede representar un cambio significativo en la producción masiva en serie, paradigma dominante hasta ahora en la construcción. Al tomar lo mejor de este paradigma y combinarlo de forma directa en la obra, con la mencionada flexibilidad y precisión, se enriquecerían los procedimientos, técnicas y condiciones de trabajo actuales, como ya ha sucedido en otros sectores de la industria manufacturera, requiriendo que la mano de obra sea cada vez más calificada.



### 1.5.5 Procesos de ensamble

Teniendo presente, como ya se ha comentado, que dos condiciones frecuentes, aunque no necesarias en la arquitectura contemporánea son, la complejidad geométrica y la variación de las partes o componentes, ambas resultado de enfoques metodológicos de diseño, se hace necesaria la adopción de estrategias que faciliten su construcción.

Por lo tanto, en concordancia con las lógicas de producción que los usos de las tecnologías de fabricación digital proponen, en una gran mayoría de casos de manera discretizada, es decir, a través de la subdivisión o fragmentación de una forma global en componentes o piezas, se hace necesario que, desde la etapa de diseño, se definan una o varias estrategias para la interpretación de la forma y la estructura. En otras palabras, mediante operaciones de composición formal, se determina una estrategia logística del proceso constructivo.

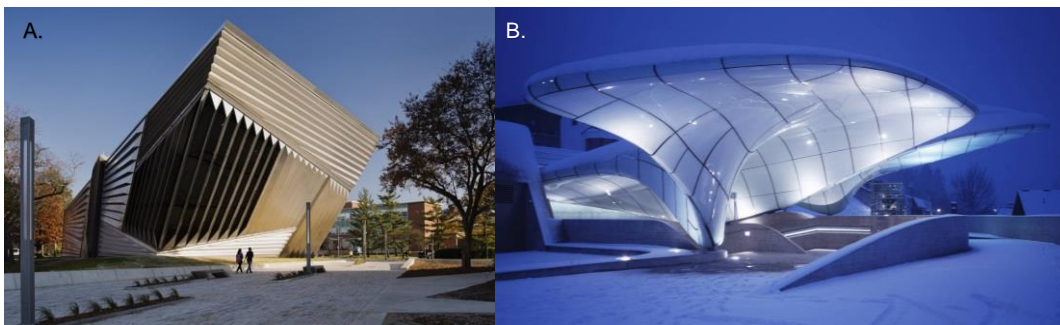
Algunas de las estrategias más comúnmente aplicadas en la fabricación digital, que se pueden observar en las figuras 1-38, 1-39 y 1-40, incluyen operaciones como el **seccionado**, que consiste en una o varias secuencias de planos seriados en una o más direcciones las cuales definen la forma del objeto. El **teselado**, que consiste en la subdivisión de superficies o volúmenes mediante retículas bidimensionales o tridimensionales, o incluso la superposición de varias de estas. El **plegado**, que consiste en la generación de pliegues o dobleces en una superficie. El **conformado** o moldeado de figuras (inclusive comprende el termoformado de superficies plásticas) y el **contorneado** que se asemeja a esculpir o tallar, así como también algunas posibles combinaciones entre estas (Iwamoto, 2009). Adicionalmente, existen otras operaciones formales como resultado de exploraciones en las capacidades de los materiales, por ejemplo, el **plegado por incisiones** o *kerf-bending*.

**Figura 1-38:** Seccionado y teselado.

(De izquierda a derecha) A. Seccionado. B. Teselado.

Fuentes: A. [www.huftonandcrow.com](http://www.huftonandcrow.com) - B. <http://fauldersonstudio.com>**Figura 1-39:** Plegado y conformado.

(De izquierda a derecha) A. Plegado. B. Conformado.

Fuente: [www.zaha-hadid.com](http://www.zaha-hadid.com)**Figura 1-40:** Contorneado y Kerf-bending.

(De izquierda a derecha) A. Contorneado. B. Kerf-bending

Fuente: A. <http://www.howeleryoon.com/> - B. <https://architecture.mit.edu>

No obstante, una marcada diferencia con otras épocas, se da con la aparición y uso del modelo tridimensional digital como fuente de información constructiva, donde a diferencia del tradicional conjunto de planos (a partir de proyecciones ortogonales bidimensionales, realizado así desde el Renacimiento), el modelo tridimensional permite establecer con precisión desde el comienzo, en las tres dimensiones del espacio la ubicación de cada uno de los elementos dentro del conjunto a construir, sin consideración de la complejidad geométrica y constructiva, ni la variación formal de los componentes.

Una de las técnicas más comúnmente empleadas para el posicionamiento de los elementos en sitio, consiste en asignar de manera automatizada un código único a cada elemento, desde la fase de diseño, produciendo así secuencias de ensamble, puesto que como convencionalmente ocurre, muchos de los elementos pueden ocupar una única posición dentro del conjunto. En algunos casos, se requiere la asistencia de equipos digitales de medición por láser o de un sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), para lograr un procedimiento de ensamble o instalación más preciso en la obra.

## **1.6 Flujos de trabajo: integración de procesos entre diseño, fabricación y construcción**

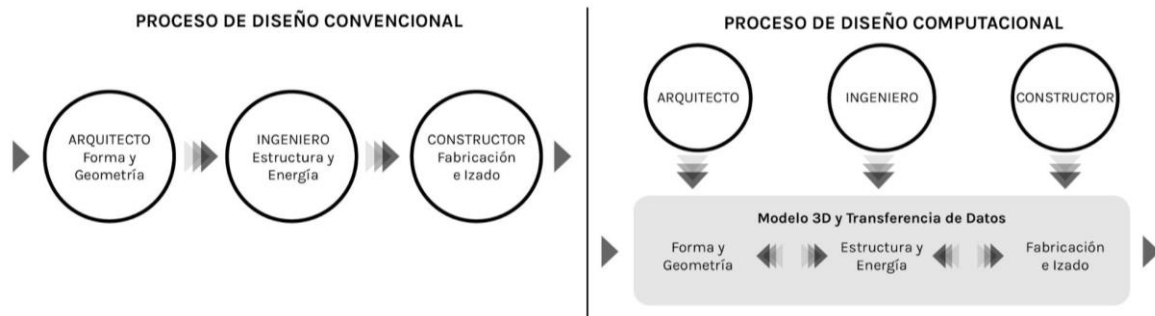
El acervo tecnológico y metodológico ofrecido por el diseño computacional y la fabricación digital, representado en instrumentos, técnicas y estrategias, tanto de diseño como de manufactura estudiados hasta ahora, presentan nuevas formas de trabajo colaborativo cuya finalidad última es la de maximizar eficiencias en la construcción. Esto es lo que plantea el concepto de producción **file-to-factory** (del archivo a la fábrica, también llamado *procesos CAD-CAM*) definido como “la fusión continua del proceso de diseño en la fabricación,” el cual “involucra la transferencia directa de datos desde el software de modelado 3d a la máquina CNC. Este emplea estrategias de diseño y fabricación digital basadas en conceptos computacionales” (Oosterhuis, 2004).

Esa fusión es reafirmada de acuerdo a Kolarevic (2003), porque cada vez más “los arquitectos (diseñadores) están siendo involucrados de manera mucho más directa en los procesos de fabricación, a medida que crean la información que es traducida por

fabricantes directamente en los datos de control de los equipos de fabricación digital.” Esto es evidencia de que “la reciprocidad entre los medios de representación y de producción no ha desaparecido completamente”. En consecuencia, “nuevas sinergias en arquitectura, ingeniería y construcción empiezan a emerger (...) cruzando los límites de las diversas profesiones,” como lo explica el diagrama comparativo que se observa en la figura 1-41. Sin embargo, “el reto está en (...) cómo desarrollar un modelo de información que facilite todas las etapas de la edificación, desde el diseño conceptual hasta la construcción (y más allá, en su administración), que provea un ambiente colaborativo continuo entre todas las partes en el proceso” (Kolarevic, 2003).

**Figura 1-41:** Diagrama comparativo de procesos de diseño.

Mientras en el diseño convencional cada actor interviene en una etapa específica, en el diseño computacional gracias a que es un esquema de información está centralizada, todos los actores involucrados en el proyecto contribuyen simultáneamente, sin embargo, la distribución de responsabilidades no está regulada por ningún protocolo, aspecto que debe acordarse en cada caso.



Fuente: Elaboración propia adaptado de Knippers, 2013.

Justamente, así como estas plataformas tecnológicas han facilitado la comunicación y distribución de la información en los proyectos mediante formas de trabajo colaborativo, en la misma medida los flujos de información se han complejizado, como lo ejemplifica el caso de la figura 1-42. De acuerdo con Scheurer (2013), a pesar de la gran expectativa que genera una metodología de operación de esa naturaleza, una queja frecuente de usuarios en el medio, tiene que ver con la incompatibilidad de estándares tanto en software como en hardware, lo que genera una percepción de insuficiencia de la tecnología empleada, motivo por el cual, aún se debe incurrir en esfuerzos adicionales para resolver problemas de interoperabilidad. Estos problemas se hacen extensivos

prácticamente a todo campo del conocimiento que este migrando sus procesos de medios análogos a digitales.

**Figura 1-42:** Complejización de los flujos de información y de trabajo.

A. Centro Pompidou-Metz por Shigeru Ban y Jean de Gastines. B. Diagrama de flujo de información entre varios programas usados en la planeación y fabricación de la estructura de cubierta de ese mismo edificio.



Fuente: A. <http://www.e-architect.co.uk/france/pompidou-centre-metz>. – B. (Scheurer, 2013).

Este autor sostiene que, a pesar de la creación relativamente reciente de formatos de archivo especializados para la industria de la construcción, como el caso del “*Industry Foundation Class*” (o *IFC* por sus siglas en inglés), un estándar diseñado para actuar entre plataformas BIM, este aún no ha sido desarrollado de modo tal que posibilite el intercambio de información de geometrías complejas como, por ejemplo, curvas y superficies NURBS, siendo estas de mucha mayor antigüedad. Esto sucede porque al considerar la baja cantidad de proyectos que emplean este tipo de geometrías dentro de toda la industria de la construcción en la actualidad, resultaría siendo un aspecto demasiado costoso dentro del desarrollo del formato, que sería ampliamente desaprovechado. En el caso de este tipo de edificios de formas complejas, siempre que una solución estandarizada no funcione para su producción, una solución a la medida deberá hallarse. Ese es el caso de las herramientas de modelado paramétrico.

## 1.7 Perspectiva del autor

La arquitectura y la construcción encaran hoy cambios profundos en su hacer, a causa de una transición y transferencia tecnológica que tuvo sus orígenes en el contexto de la

segunda guerra mundial y su consolidación en la posguerra, pero que solo hasta finales del siglo XX, empezó a tener impactos perceptibles a nivel global. Dicho cambio tecnológico ha promovido, la aparición de nuevas propuestas estéticas y técnicas, pero también nuevas complejidades constructivas que empiezan a reformular las jerarquías y estructuras interdisciplinarias tradicionales entre arquitectura, ingeniería y construcción, con metas e impactos compartidos como el aumento de la eficiencia de procesos y la reducción de consecuencias negativas para el medio ambiente.

Como consecuencia de la masificación del consumo de la tecnología digital, se ha producido un incremento gradual en la difusión y acceso a la misma, incluso en contextos donde no es producida. Se puede afirmar entonces que, en la actualidad, una gran mayoría de los medios de producción digital están al alcance de arquitectos, ingenieros y constructores, haciéndolos usuarios consumidores. Sin embargo, también esa misma disponibilidad sumada a una apertura de conocimientos que facilita la producción de nuevos desarrollos a medida, están generando usuarios productores, escenario en donde estos últimos están en capacidad de resolver dificultades propias o crear propuestas innovadoras.

Por lo tanto, existen indicios para pensar que estos avances tecnológicos, pueden contribuir a crear terrenos de oportunidad en países en desarrollo y por ende no industrializados, dado que la mencionada accesibilidad a los mismos, se acelera y se abren caminos para su democratización, en donde claramente la única alternativa ya no sería por antonomasia la de transferencia tecnológica, sino la de apropiación tecnológica, de la cual como se verá más adelante, se dan ejemplos de casos importantes del saber local adaptado al *know how* digital.

Esto ocurre en buena medida, debido a iniciativas globales para la democratización del acceso a estas, específicamente a través de los *laboratorios de fabricación digital* (más conocidos como y en adelante, **Fab Labs**) o también por fenómenos culturales como el *Do-It-Yourself* (Hágalo Usted Mismo) representado hoy en día, por amplias manifestaciones participativas e internacionales como el movimiento Maker –e incluso algunos de espíritu activista en su misión- concentrados en forma de *Makerspaces* o *Hackerspaces*, de naturaleza muy similar a los FabLabs.

La iniciativa original de los FabLabs, surge en el año 2001, en el Center for Bits and Atoms del MIT. Su objetivo principal es el empoderamiento del usuario para proponer soluciones creativas a problemas locales, pero con impacto global. Esto se logra mediante la apropiación de estas nuevas tecnologías (fabricación digital, computación física, interactividad, diseño computacional, entre otras) a partir de múltiples recursos de código abierto, es decir como un proyecto dinámico, colaborativo y sin ánimo de lucro, enmarcadas a su vez en proyectos de investigación y desarrollo de diversas áreas, bajo la consigna “cómo hacer (casi) cualquier cosa.”

En otras palabras, los FabLabs buscan transformar la producción industrial tradicional en una producción personal de bajo costo. Con ello se pretende generar una transición del modelo tradicional del consumidor, aquel quien demanda un producto, al de *prosumidor* (Toffler, 1980), aquel quien consume, personalizando su producción. Esta iniciativa ya agrupa una red presente en más de 40 países, con más de 200 laboratorios que abarca desde espacios comunitarios hasta centros de investigación avanzada, comúnmente vinculados a universidades. En ellos se reúnen fabricantes, artistas, científicos, ingenieros, educadores, estudiantes y en general toda persona interesada al respecto.

Por otra parte, se encuentran los RhinoFabLab, laboratorios promovidos por el fabricante de software CAD McNeel Associates, de los programas Rhinoceros 3d y Grasshopper. Estos inicialmente surgen como soporte para resolver problemas de fabricación de los diseños realizados por sus usuarios. Actualmente se concentran en la mejora de la implementación de métodos usados en la práctica de la arquitectura y el diseño, explorando diferentes posibilidades de manufactura a través del acceso a equipos para desarrolladores, talleres de capacitación, foros, empleos e intercambio de experiencias. Para el año 2013 se habían establecido 14 de estos laboratorios en 6 países (Herrera y Juárez, 2011).

En adición a estas iniciativas, un conjunto de laboratorios más especializados insertos en contextos académicos, así como también algunas iniciativas empresariales en diferentes países de Latinoamérica, han estado investigando y usando estas tecnologías, en relación con arquitectura, diseño y construcción. En algunos casos, para la exploración de soluciones a problemas de su contexto, en otros, para desarrollo y manufactura de aplicaciones de pequeña y mediana escala, los cuales se verán a continuación,

demostrando cómo, tanto la adopción como la apropiación tecnológica de los nuevos medios digitales, aún se encuentra una etapa incipiente dentro de la región y sus efectos para la industria de la construcción aún no se pueden percibir.



## 2. Análisis del Contexto Regional

A diferencia de contextos socioeconómicos y socioculturales como el norteamericano y el europeo, donde el principal mecanismo que ha promovido la incorporación de la fabricación digital en la construcción, ha sido la interacción entre la academia y la industria, en el contexto latinoamericano, no se ha podido observar un fenómeno similar. Con el presente análisis se busca presentar una idea general acerca del origen y estado actual sobre la adopción y en menor medida, apropiación de las herramientas de fabricación digital en Latinoamérica y su implementación en la industria de la construcción. Para esto se dividirá el objeto de estudio en tres grupos: 1. Instituciones Educativas, 2. Diseñadores, 3. Consultores - Fabricantes, describiendo en cada uno, ejemplos destacados de su producción. Lo anterior, en consideración preliminar de que este primer triángulo interrelacional de producción arquitectónica mediada digitalmente, constituye una muestra suficiente en primera instancia, para abordar el tema en una búsqueda de antecedentes mínimos que oriente los objetivos de este estudio.

En el primer grupo se incluyen organizaciones como los laboratorios de fabricación digital o FabLabs, tanto de las redes anteriormente mencionadas (MIT y McNeel), independientemente de si se encuentran adscritos a universidades u otras entidades y así mismo se incluyen laboratorios desligados de cualquier otra red, pero que principalmente forman parte de instituciones educativas.

El segundo grupo reúne a oficinas o estudios de arquitectura y diseño, que dentro de sus desarrollos hayan llevado a cabo o se encuentren realizando proyectos donde exista evidencia del uso de herramientas de diseño computacional y fabricación digital. En este grupo también se incluyen empresas que, al prestar servicios de consultoría aplicadas a

procesos de diseño y/o construcción, permitan evidenciar la utilización de esas mismas herramientas.

Por último, el tercer grupo recopila aquellas compañías que, al servicio de proyectos de construcción, han producido (fabricado y ensamblado o instalado) partes, componentes o sistemas de elementos constructivos mediante herramientas de fabricación digital, bien sea como prototipos o como piezas finales, e inclusive, si como parte de sus servicios se presta la asesoría o consultoría en tales procesos.

## 2.1 Instituciones educativas

De acuerdo con el análisis que los arquitectos Pablo Herrera y Benito Juárez (2011) hacen sobre el grado de incorporación de las tecnologías para desarrollo de diseños o construcción mediado digitalmente en el contexto latinoamericano dentro del ámbito académico, a partir del año 2007 y centrado en Sudamérica (dividida por los autores en tres grupos así: Cono Sur (Argentina, Chile, Uruguay y Paraguay), Región Andina (Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela) y Brasil), en donde existen tres modalidades a través de las cuales ha tenido lugar dicho fenómeno, que sintetizan como de transferencia, de co-investigación y de auto-exploración, así:

1. **Transferencia de conocimiento:** Diversas universidades de la región formalizan iniciativas en áreas relacionadas a esta implementación tecnológica, mediante grupos de investigación que involucran estudiantes latinoamericanos a nivel de maestría y doctorado, provenientes de regiones como Norteamérica y/o Europa. Ellos transmiten su experiencia por medio de la creación de nuevos laboratorios vinculados a instituciones educativas y también en forma de conferencias, cursos para profesionales y workshops (teórico-prácticos de corta duración). Este proceso empieza en Brasil y Chile alrededor del año 2007, posteriormente llega a Uruguay, Perú y Colombia. De lo que se puede observar en principio, la puja que ejercen nuevas generaciones de investigadores que retan incluso la locación geográfica y con ello las mismas culturas tecnológicas a donde ingresan con métodos y resultados e incluso materiales y técnicas para esos contextos hasta ahora inusitados.

2. **De académicos expertos que visitan la región:** Por iniciativa de investigadores locales, se invita a diferentes expertos del círculo académico internacional para dictar workshops. Nuevamente esto ocurre en primera instancia en Chile, luego en Perú y más tarde en Colombia. En esta modalidad se incluye la monitoria de FabLabs del MIT y de McNeel instalados en la región. En estos últimos se realiza desde 2009 el workshop D-O-F (Diseño - Optimización - Fabricación) en Colombia, Chile, Argentina, Perú y Brasil.
3. **Del auto-aprendizaje:** Esta modalidad agrupa arquitectos que, tratando de resolver sus propias inquietudes y exploraciones respecto a temas de modelado paramétrico y fabricación digital, difunden sus propias experiencias mediante blogs, tutoriales y cursos. Chile es el país donde esta modalidad ocurre con mayor intensidad. La fuerte influencia de la auto-publicación de contenidos abiertos acerca de experiencias individuales o colectivas en este campo, comienza a crear a partir del interés demostrativo o mayormente a partir de los foros prácticos o académicos, un acervo de conocimiento abierto y participativo con un impacto especial en una carrera implícita por la competitividad y el descubrimiento.

Así, a través de estos tres caminos, se marca una diferencia muy grande en comparación a cómo se ha dado el mismo fenómeno en el contexto de países desarrollados, en donde esta incorporación tecnológica a ocurrido casi en paralelo entre academia e industria. Los mencionados autores citan a su vez a la arquitecta Marina Waisman al respecto, quien sostiene que “para europeos y norteamericanos el camino hacia la alta tecnología ha sido el de una evolución sostenida, de tal modo que su adopción fue el modo lógico de responder a la propia circunstancia”, mientras que en Latinoamérica “la alta tecnología se transformó en el símbolo del progreso y su utilización devino en signo equívoco de una modernidad aparente” (1995).

De todo lo anterior se establece preliminarmente y como oportunidad que, para el contexto local, la multiplicación del modelo de transferencia, la expansión del modelo conceptual con apropiación cultural y material, y el desarrollo de repositorios teórico-prácticos vía nuevos medios, podrían constituir una pista de apropiación local y desarrollo innovador y participativo en el tema.

Por otra parte, el proceso de penetración del modelo tecnológico de medios digitales, también ha tenido sus dificultades importantes de capitalizar. Conviene recoger desde Herrera y Juárez, para el contexto latinoamericano aquello que indican como **dificultades en la implementación de la tecnología para promover la fabricación digital**, esto quiere decir que, la falta de instalación más FabLabs en la región se debe a cuatro factores básicos como son asequibilidad, soporte, burocracia, y educación, así:

1. Factor **económico**: La adquisición de equipos de fabricación digital puede ser de 3 a 8 veces más costosa que en Estados Unidos o Europa, a lo que se deben sumar los costos de capacitación de personal. Punto que tiene su contrapartida, en la capacidad de apropiación que se tiene en el medio latinoamericano y la facilitación de instrumental que promueven los formatos abiertos de las aplicaciones tecnológicas que cada vez se facilitan más, hacia una sincronización de medios técnicos para lograr los mismos resultados.
2. Factor de **gestión y mantenimiento**: El tiempo requerido para acceder a un *FabAcademy*, que es el programa de capacitación y supervisión de los mecanismos de investigación, aplicaciones e implicaciones de la fabricación digital, impartido por la red FabLab del MIT, es 6.5 veces mayor en Latinoamérica en comparación con regiones como Norteamérica o Europa. Esta capacitación es requisito para fundar nuevos laboratorios de la red y habilita al participante para su gestión. Lo cual hace parte de su propio modelo de validación entre laboratorios, con múltiples beneficios a nivel de transferencia de conocimientos, de acompañamiento y de actuación en red interconectada cada vez más global, donde esta última es el medio por el cual se allanan cada vez más las posibles diferencias técnicas y culturales que antes eran denominador común de las distancias competitivas regionales.
3. Factor **administrativo**: La burocracia en instituciones principalmente públicas y aún en casos donde se cuenta con recursos económicos suficientes, es un lastre para la apertura de nuevos laboratorios. Se han registrado casos en Latinoamérica, como el del FabLab de Lima, donde se tomó tres veces más tiempo la apertura de esta instalación que con respecto a laboratorios en Europa o Estados Unidos. Lo anterior genera claramente un llamado de atención respecto a la flexibilidad estructural que debe tener toda organización que quiere llegar a involucrarse con este proceso, donde modelos pedagógicos tradicionales

---

entrarían en crisis ante metodologías contemporáneas de aproximación al sujeto creativo.

4. Factor **educativo**: Mientras la implementación de nuevas tecnologías continúe ocurriendo bajo el actual modelo de consumo y no uno de desarrollo y descubrimiento, el proceso de generación de innovación dentro del diseño y la construcción continuará relegado. Esto promueve que profesionales, empresas e incluso organizaciones gubernamentales centren su actividad en la producción o el comercio, destinando muy poco para la innovación. Este proceso, denominado internamente como de democratización tecnológica promueve una nueva mirada de la concepción educativa para la producción, hacia uno “para el desarrollo”, lo que implica cambios profundos en los modos de hacer, en el doble par que implican el generar y transmitir conocimiento y el desarrollar e innovar en la producción y sus implicaciones en el ámbito de lo constructivo.

Parte de esta sintomatología se menciona en la investigación “Migratory Movements of Homo Faber: Mapping Fab Labs in Latin America” (Sperling, Herrera y Scheeren, 2015), la cual presenta un estudio geolocalizado de los orígenes de los laboratorios de fabricación digital en Latinoamérica, clasificándolos según su equipamiento y los usos o aplicaciones desarrolladas en los mismos. También rastrea los patrones de migración de sus fundadores, en el proceso de transferencia de conocimientos. Este estudio señala, además, que la fabricación digital en la región co-existe en un contexto de desarrollo desigual de industrialización tardía y reciente y debe hacer frente a una diversidad de retos en inversión económica e infraestructura para la investigación. Pero a su vez, señala que el tema despierta un creciente interés tanto local como foráneo, el cual se ha manifestado en una diversidad de formatos que hasta ahora incluye artículos, exposiciones, una mesa redonda, un simposio y una conferencia.

Así mismo, indica que, a pesar de los cuatro factores mencionados por Herrera y Juárez, Latinoamérica cuenta desde finales de los años 90 con algunos laboratorios de fabricación digital, inicialmente en Brasil, que se encuentran vinculados a instituciones educativas, pero también a organizaciones de investigación y a la industria en general. No obstante, desde su fundación estos estaban mayormente enfocados en proyectos de visualización arquitectónica y simulación computacional. Con el paso de los años, una

reducción de los costos de la maquinaria de fabricación digital y la expiración de algunas patentes, facilitó su proceso de adquisición.

Gracias a esto, pudieron reorientar sus actividades hacia una producción de pequeña escala, concentrada en el diseño de productos y prácticas interdisciplinarias, que solo recientemente empezaron a ganar la atención por parte de los arquitectos. Lo que denuncia claramente el proceso de apropiación vivido que se traduce, como apuesta por diferentes posibles “fases”, las de: puerta educativa, espacio de investigación, potencial para simulaciones, aplicativos industriales de bajo impacto y costo, oportunidad en el fenecimiento de patentes, reestructuración y valoración de la producción de pequeña escala asociada e interdisciplinar como medio de escalamiento e irrupción progresiva en sujetos creativos de escala humana como la arquitectura y el urbanismo, en un listado que ya podría dar pistas acerca de modelos de apropiación prácticos y pedagógicos de gran importancia aplicada.

De forma complementaria, Sperling también ha sido el curador de la exposición “Homo Faber - Digital Fabrication in Latin America” en el marco de la conferencia “CAAD Futures 2015 - the next city”. En este evento se presentaron trabajos destacados de algunas de las mismas instituciones estudiadas en la investigación anteriormente mencionada. En estos dos trabajos recopilatorios se incluyeron también, algunas instituciones que por su constitución legal no se consideran de carácter académico o investigativo, como son algunos estudios de diseño industrial y oficinas especializadas de consultoría.

Tanto de la exposición como del estudio, que buscó encuestar a un grupo de 48 instituciones de la región al que solo 31 respondieron, se seleccionan de ese grupo para este trabajo, solamente aquellas instituciones de la región que siendo de carácter académico e investigativo -grupos de investigación, laboratorios de fabricación digital independientemente de su afiliación a una red o institución educativa específica o la respectiva cooperación entre los mismos- son relevantes dentro del ejercicio de la construcción por su producción.

Esta selección se realizó considerando los usos dados a la tecnología de diseño computacional y fabricación digital, las aplicaciones estudiadas o desarrolladas con las mismas y su traducción a productos académicos que pueden representar un aporte

potencial para la construcción, sin desconocer la existencia y el trabajo de otros grupos e instituciones que abordan el estudio de los mismos medios y herramientas con aportes y finalidades diferentes a la construcción. Complementariamente, los mencionados trabajos -investigación y exposición- aportaron a este trabajo una base de datos de instituciones e investigadores que facilitó una búsqueda extendida de trabajos que cumplen con características similares. La selección resultante ha sido dividida en dos grupos que se describen a continuación.

- Producción Investigativa

Comprende proyectos investigativos que buscan generar un aporte o expandir el conocimiento en el tema, en torno a problemas y objetivos específicos y cuyos resultados o trabajo en curso es reportado en forma de artículos u otro tipo de publicaciones, como las que se describen a continuación en la Tabla 2-1. Algunos de estos proyectos han conducido al desarrollo de prototipos o modelos a escala a partir de sus propias metodologías. Aquí se recopilan algunas de las más representativas de la relación entre fabricación digital y construcción.

**Tabla 2-1:** Instituciones académicas latinoamericanas con producción investigativa o servicios relacionados con la utilización y análisis o implementación de herramientas digitales en procesos de diseño y construcción.

Institución- Ciudad- País	Investigación, Publicación o Proyecto / Servicios	Resumen
LAPAC: Laboratório de Automação e Prototipagem para a Arquitetura e Construção – Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Estatal de Campinas - Campinas, Brasil	PUPO, R. Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. PARC n.3, vol.1, nov. 2008.	Este estudio contiene un triple objetivo: 1. Presentar un <b>estado del arte del prototipado rápido y la fabricación digital</b> para la arquitectura y la construcción. 2. Identificar el <b>impacto de las nuevas tecnologías en la investigación y la enseñanza en Brasil</b> en la actualidad. 3. Relatar algunas experiencias didácticas desarrolladas en el LAPAC.

Tabla 2-1 (Continuación).

<p>LAPAC: Laboratório de Automação e Prototipagem para a Arquitetura e Construção – Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Estatal de Campinas - Campinas, Brasil</p>	<p>CELANI, M. G. C. ; PINHEIRO, Érica ; GRANJA, Ariovaldo D . Lean thinking and rapid prototyping: towards a shorter distance between the drawing board and the construction site. In: Virtual and Rapid Prototyping 2007, 2007, Leiria. Proceedings of the Virtual and Rapid Prototyping 2007, 2007.</p>	<p>Este artículo discute el <b>rol del prototipado rápido dentro de un proceso "Lean"</b>, desde el concepto de diseño hasta la construcción de la edificación. Se revisa el papel de los modelos CAD en 3d y el prototipado rápido dentro del proceso de diseño, luego se examina el estado del arte en los campos de la manufactura rápida las técnicas automatizadas de construcción basadas en los modelos presentados, para por último, <b>discutir la inserción de prototipado rápido dentro de los procesos de diseño y de construcción.</b></p>
	<p>ROCHA, D. H., PUPO, R., e CELANI, G. Fabricação Digital e sua aplicação no corte de fôrmas de concreto: um exercício de produção. NUTAU 2010. São Paulo, FAUUSP, 2010.</p>	<p>El objetivo de esta investigación fue el estudio de la <b>producción de moldes para piezas de concreto con geometrías complejas a partir de modelos digitales mediante técnicas de fabricación digital.</b> Se analizaron ventajas y desventajas definiendo una metodología y parámetros. Se produjo una pieza de geometría compleja en concreto para una escultura, imposible de obtener sin el uso de una fresadora cnc. El estudio demostró la viabilidad del concepto "file-to-factory" en la construcción civil, resaltando las ventajas en economía de materiales que este puede conllevar.</p>
	<p>BONALDO, T.; GRANJA, A. D.; CELANI, G.; OLIVEIRA, M. F. e SILVA, J. V. L. Prototipagem Rápida no Processo de Produção Digital de Edificações. VIII Workshop Brasileiro - Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios, 2008, São Paulo. Anais. São Paulo, 2008. p. 1-8.</p>	<p>Estudio exploratorio sobre el <b>potencial de uso de modelos</b> producidos mediante <b>prototipado rápido durante un proceso productivo de un edificio</b>, haciendo énfasis en la <b>producción de partes de construcción complejas</b>, que puedan presentar dificultades de comunicación entre los diferentes participantes del proceso (diseñadores, contratistas, residente y la industria de componentes para la construcción). Se eligió una parte de un edificio diseñado por un arquitecto reconocido (fachada del Museo de Arte Africano de Bernard Tschumi) en el que se presentaban detalles constructivos complejos. A partir del material gráfico disponible se desarrollaron modelos físicos a escala usando técnicas de prototipado rápido, que serían expuestos ante los profesionales en distintas etapas de la construcción. Al entrevistar a estos profesionales, los autores esperan poder evaluar la utilidad de los modelos realizados, en la interpretación de las ideas del diseñador. De ser así, estos modelos contribuirían a conseguir un producto final mucho más cercano a la concepción original del diseñador.</p>



**Tabla 2-1** (Continuación).

<p>LAPAC: Laboratório de Automação e Prototipagem para a Arquitetura e Construção – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura y Urbanismo de la Universidad Estatal de Campinas - Campinas, Brasil</p>	<p>Modelagem Paramétrica em Arquitetura: Estratégias para Materializar Formas Complexas</p>	<p>Esta investigación estudia la <b>relación entre el modelado paramétrico y la fabricación digital de formas complejas en arquitectura</b>. La complejidad involucrada en el diseño contemporáneo ha demandado <b>nuevos procedimientos</b>, tanto desde su concepción como <b>para hacer viable su construcción</b>. Así, el <b>modelado paramétrico y la fabricación digital han permitido a arquitectos e ingenieros, concebir, detallar y construir estructuras complejas con mayor precisión y velocidad</b>. En este artículo el autor contribuye a la discusión en este campo, aún incipiente en Brasil, particularmente en los procesos de enseñanza-aprendizaje.</p>
	<p>“La fabricación digital en el proceso de producción arquitectónica”. Autor: Barbosa, W. Tutor: Celani, G. Perteneciente a línea de investigación Tecnologías 3d</p>	<p>Partiendo de la lenta incorporación de los métodos de fabricación digital en los procesos de producción en Brasil, comparado con otros países, esta investigación se enfoca en la <b>producción de elementos arquitectónicos para la industria de la construcción mediante procesos file-to-factory</b>, con énfasis en técnicas sustractivas de corte. Tras una búsqueda sobre el estado del arte en esta área y dos casos de estudio, se realizó un ejercicio práctico. El proceso fue documentado en detalle y analizado para sistematizar sus procedimientos a fin de obtener una referencia para futuras aplicaciones en arquitectura.</p>
	<p>PUPO, R.; Mendes, L.; De Martino, J. “From parametrization to digital fabrication” en Augmented Culture: Proceedings of the 15th Iberoamerican Congress of Digital Graphics, 163-166. SIGraDi. Santa Fe, Argentina, 2011.</p>	<p>En esta investigación se <b>discute el impacto</b> de nuevas tecnologías como el <b>prototipado rápido</b> y la <b>fabricación digital en los procesos de diseño</b>, junto con la introducción del software de <b>modelado paramétrico</b>, los cuales presentan perspectivas de innovación en el diseño. En un intento por evidenciar la asociación de estas tecnologías a dichos procesos, como parte de este proyecto se desarrolló un prototipo de cubierta (instalada en un área específica del campus), como resultado de una asignatura del programa de posgrado de esta universidad. <b>El uso de estas tecnologías en este ejercicio permitió el análisis de su impacto en cada fase del mismo.</b></p>
	<p>“Integración entre analógico y digital en arquitectura”. Celani, G.; Gorsten, F. (2015)</p>	<p>La arquitectura contemporánea se apoya en gran medida en tecnología y métodos de alta precisión, tales como el diseño paramétrico y la fabricación digital. Sin embargo, <b>a menudo se requiere trabajar con estructuras y formas pre existentes</b>, las cuales no solo son irregulares sino también efímeras. En este artículo se describe un ejercicio de diseño en el cual <b>una estructura de bambú fue digitalizada y se modeló de manera paramétrica un sistema de cubierta que posteriormente se fabricó para dicha estructura.</b></p>

Tabla 2-1 (Continuación).

<p>LAGEAR: Laboratório Gráfico para Experimentação Arquitetônica – Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidad Federal de Minas Gerais - Minas Gerais, Brasil</p>	<p>Proyecto fresadora cnc de bajo costo</p>	<p>Debido al alto costo de la cortadora láser con que cuenta el laboratorio y su dificultad de operación, se desarrolló un prototipo de fresadora CNC más simple y de bajo costo, con el fin de hacer disponible de manera más libre para los estudiantes (inclusive fue <b>ideada para ser usada en comunidades de bajos recursos</b>). Una primera versión ya fue montada y diversos problemas deben ser corregidos en una segunda versión.</p>
	<p>Woka</p>	<p>Woka es la conjunción de dos conceptos y dos palabras, por un lado, el término Wiki, del proyecto <i>Wikihouse</i> y "oca", habitación o morada indígena. Se trata de un <b>sistema constructivo de código abierto</b> basado en la lógica del Hágalo-Usted-Mismo, en ese sentido pretende ser una <b>actualización de la tradición constructiva de los pueblos indígenas</b>, en la que los moradores proyectan y construyen sus propias viviendas. En este caso, cualquier persona puede proyectar de acuerdo a sus necesidades, descargar los archivos e imprimir o cortar los componentes para ensamblar una casa, que además <b>puede ser complementada mediante sus conocimientos colectivos o tradiciones constructivas locales</b>. Las primeras etapas de esta investigación se han concentrado en crear modelos para estudiar el sistema de uniones de los elementos y su organización, para este fin, un modelo a escala 1:75 fue elaborado. Posteriormente, se realizará un estudio sobre <b>cómo diferentes materiales pueden interactuar y ser acoplados con la estructura de la casa</b>, especialmente aquellos que la gente tiene más fácilmente a su disposición como láminas o varas de madera o el ladrillo. Esto se realizará cuando un modelo a escala real se construya una vez se cuente con los recursos económicos suficientes.</p>
<p>Área Computacional Departamento de Arquitectura y el Centro Integrado de Manufactura y Automatización CIMA - Universidad Técnica Federico Santa María - Valparaíso, Chile</p>	<p>Reproducción robotizada de elementos estructurales y ornamentales de geometría compleja para la restauración y rehabilitación del patrimonio arquitectónico chileno en madera.</p>	<p>Para este proyecto se experimenta con la reproducción de prototipos de diversas uniones estructurales de carpintería (en madera de pino radiata), tradicionales de la construcción patrimonial en madera de Chile. Para su fabricación se cuenta con un brazo robótico industrial para el cual se ha elaborado una herramienta de fresado específica para esta labor. La programación de los procedimientos para la fabricación se realizan mediante software de modelado paramétrico.</p>

**Tabla 2-1** (Continuación).

<p>Área Computacional Departamento de Arquitectura y el Centro Integrado de Manufactura y Automatización CIMA - Universidad Técnica Federico Santa María - Valparaíso, Chile</p>	<p>Chiarella, M.; González, L.; Calvo, C. (2013) "Robots: Automatización en Diseño y Construcción para la Enseñanza de Arquitectura" en SIGraDi 2013 Proceedings of the 17th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics Chile - Valparaíso 20 - 22 November 2013, pp. 439 - 443</p>	<p>Existe una <b>creciente popularidad</b> que están ganando los ambientes de <b>programación visual y los robots industriales</b> controlados a través de software de diseño paramétrico en la <b>investigación de procesos constructivos no convencionales</b> en la arquitectura. La automatización de procesos que es personalizable por medio de componentes variables, <b>promete convertirse en un estándar de la industria</b>, donde los costos llegarán a ser similares a los de los actuales métodos de prefabricación industrial, aunque esta afirmación, aún no es completamente comprobable. Con el fin de <b>brindar competencias sobre diseño modular no seriado de componentes</b>, se desarrolló una iniciativa de enseñanza en Latinoamérica, el Taller Avanzado de Diseño Arquitectónico - USM. La estrategia empleada se basa en <b>incorporar conceptos e instrumentos de Automatización para la Construcción y el Diseño para procesos CAD/CAM</b> a partir del uso de un brazo robótico de 6 ejes KUKA KR 125/2.</p>
<p>Departamento de Diseño y Teoría Facultad de Arquitectura de la Universidad del Bio- bio, Chile</p>	<p>García, R. (2011) "Fabricación Digital de Modelos Constructivos" en Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia N° 59, pp. 145-157</p>	<p>Este trabajo plantea una <b>clasificación preliminar de los equipos de fabricación digital, y sus usos posibles en el diseño y ejecución de edificios</b>. Se propone la <b>elaboración de modelos constructivos</b> por cortadoras láser para <b>estudiar posibilidades materiales e industriales</b>. Luego, se plantean estrategias de diseño digital para la elaboración de estos modelos, y se expone el desarrollo de un programa interno en un software de modelación 3D. Finalmente <b>se analizan algunas condiciones de los modelos ejecutados</b> con esta implementación, <b>verificando la revisión de aspectos constructivos</b> en el diseño, así como de <b>optimización e industrialización</b>.</p>
	<p>García, R; Otálora, O. (2012) "Eco-losas: desarrollo de componentes constructivos más eficientes por análisis topológico y diseño paramétrico" en SIGraDi 2012 Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics Brasil - Fortaleza 13-16 November 2012, pp. 630-632</p>	<p>Este trabajo expone un <b>sistema de construcción de placas horizontales para funcionar como entrepisos en edificios irregulares de concreto</b>. Con base en un Análisis de Elementos Finitos evolutivo de la configuración topológica para obtener un diseño curvo con un reducción del 50% del volumen tradicional, lo que provee un costo y huella de carbono menores, un mejor desempeño y un cielorraso novedoso, se elaboró una librería de perfiles de acuerdo a diferentes cargas, apoyos y dimensiones, se implementó en un sistema de diseño paramétrico con el fin de <b>producir geometrías para el estudio de su integración en la edificación y para elaborar archivos de fabricación digital</b>. Se han estudiado diferentes estrategias constructivas y fabricado varios prototipos.</p>

Tabla 2-1 (Continuación).

<p>Departamento de Diseño y Teoría Facultad de Arquitectura de la Universidad del Bio-bio, Chile</p>	<p>García, R. et. al. (2014) "Parametric Development of Variable Roof Structures with Central Supports (Tulips)" en Nexus Network Journal August 2013, Volume 15, Issue 2, pp 257-269</p>	<p>Este trabajo describe la <b>exploración de un sistema paramétrico para generar diseños variables de unidades de cubiertas de bajo costo con un apoyo central</b> (llamadas "tulipanes"). Las unidades tienen por objeto cubrir áreas exteriores y están compuestas por parales de madera de formato comercial, placas fabricadas digitalmente y una cobertura en tela para permitir su producción masiva y variaciones de acuerdo a diferentes condiciones estructurales, funcionales y climáticas. <b>El desarrollo ha combinado análisis topológico, algoritmos genéticos, programación paramétrica y fabricación digital</b> para producir modelos a escala y prototipos a escala real. Este proceso sugiere un <b>enfoque para racionalizar el diseño a través de análisis matemático e implementación digital</b> que apoya su elaboración rápida y flexible. Este ejemplo <b>ilustra nuevos métodos de diseño arquitectónico con la integración temprana de estudios técnicos y producción industrial.</b></p>
<p>Universidad del Bio-bio - Universidad Católica (Chile)</p>	<p>García, R.; Lyon, A.(2014) "De la Optimización Estructural Evolutiva al Diseño Paramétrico basado en desempeño; experiencias en plataformas integradas para estrategias de diseño multidisciplinares" en SIGraDi 2011 Proceedings of the 15th Iberoamerican Congress of Digital Graphics Argentina - Santa Fé 16-18 November 2011, pp. 201-205</p>	<p>Este artículo presenta la investigación desarrollada por un equipo multidisciplinar enfocado en el uso de Optimización Topológica y su integración a plataformas colaborativas en etapas tempranas del proceso de diseño arquitectónico. El interés de esta experiencia está en <b>cómo los modelos de Optimización Estructural Evolutiva (ESO) pueden ser integrados en Diseño Paramétrico para la definición de componentes adaptables en respuesta criterios de desempeño ambiental, constructivo y arquitectónico.</b></p>
<p>Non-Con: Non Consensual Architectural Practice y Pontificia Universidad Católica de Chile</p>	<p>Banda, P.; Lyon, A.(2013) "Agregados Inflables y Patrones Emergentes: Logro de Patrones de Orden Superior mediante Compresión Axial" en SIGraDi 2013 Proceedings of the 17th Iberoamerican Congress of Digital Graphics Chile - Valparaíso 20 - 22 November 2013 pp.239-243</p>	<p>Este trabajo consiste en una <b>exploración de diseño generativo de Componentes Agregados Inflables</b>, gobernados por configuraciones locales y su comportamiento mecánico, evaluados a través de un medio digital. Los objetivos a conseguir son 3: Hallar patrones de orden mayor en diseño generativo empleando un entorno de elementos simple y definido, <b>ejecutar soluciones emergentes diseñando para el uso de materiales disponibles en el mercado y técnicas de baja tecnología (low-tech)</b>, Intensificar el pliegue en las interacciones entre los elementos inflados.</p>

**Tabla 2-1** (Continuación).

<p>Investigación entre Universidad del Bío-Bío, Universidad de Concepción (Chile) y Centro Universitario Lasalle (Brasil) con apoyo del Fondo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y el Consorcio Masisa</p>	<p>Bruscato, U.; García, R. "Muro-pixel: exploración digital de un sistema constructivo de placas entrelazadas" en SIGraDi 2010 Proceedings of the 14th Iberoamerican Congress of Digital Graphics Colombia - Bogota 17-19 November 2010, pp. 205-208</p>	<p>Este artículo reporta el desarrollo inicial de un <b>sistema constructivo basado en láminas interconectadas procesadas mediante fabricación digital</b>. El sistema se basa en la elaboración de ranuras en piezas regulares mediante cortadora láser o fresadora cnc para <b>desarrollar configuraciones auto portantes</b>. Un sistema de diseño paramétrico ha sido llevado a cabo varios modelos a escala y prototipos a escala real han sido construidos. Aunque el sistema requiere evaluación de sus características estructurales, de producción y de mantenimiento, <b>ofrece alternativas novedosas de construcción</b>. Esta experiencia propone una forma innovadora de desempeñar investigación experimental para el desarrollo de nuevos productos y diseños posibles.</p>
<p>Fab Lab Lima (red CBA-MIT) - Lima, Perú</p>	<p>Servicios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asistencia Técnica para el despliegue de Laboratorios de Fabricación Digital y de Biología Sintética.</li> <li>▪ Consultoría en prototipado y manufactura rápida.</li> <li>▪ Consejería para adopción de nuevos materiales.</li> <li>▪ Servicios de diseño, ingeniería y prototipado.</li> <li>▪ Programas y Proyectos de Investigación aplicada para Empresas</li> </ul>	<p>A pesar de que aún, este laboratorio no ha divulgado publicaciones u otro tipo de medios sobre sus proyectos investigativos, lo que impide observar si estos podrían tener alguna relación con la construcción, este laboratorio se incluye en esta selección dada la importancia que tiene como supernodo para la región, dentro de la red de fablabs del MIT. Su oferta de servicios y áreas de desempeño lo convierten en un centro de desarrollo de innovación con un alto potencial para generar avances aplicables dentro de la actividad constructora a partir del uso, apropiación y desarrollo de tecnologías de fabricación digital. De esa misma oferta, por una parte, se destaca un <b>énfasis en el área de materiales</b>, por otra, es el primer y hasta ahora único laboratorio de la región, que trabaja el tema de <b>biología sintética</b>. Tal y como se describe en su página web, <b>esta nueva vertiente de esa ciencia tiene por objetivo "el diseño de sistemas biológicos que no existen en la naturaleza"</b>. Mediante ella se pueden construir "sensores, dispositivos, sistemas y máquinas usando genes sintéticos que son programados como si fueran una computadora y luego modifican los procesos en moléculas y estructuras moleculares". Las ventajas que conlleva son bastante grandes para la industria en general, pues se estaría pasando de un modelo de producción que ha demostrado ser bastante perjudicial para el medio ambiente, a uno mucho más limpio, basado en la naturaleza. <b>Para la construcción esto representa una oportunidad muy grande mediante el desarrollo de nuevos materiales y procesos.</b></p>

Fuente: Elaboración propia.

- Producción didáctica

Recopila productos académicos desarrollados en una duración de tiempo y alcance más cortos que respecto a los del grupo anterior, generalmente en el marco de asignaturas académicas o workshops, comúnmente asistidos por personal docente externo a las instituciones. Sus objetivos son principalmente, difundir aspectos básicos del diseño computacional y la fabricación digital y proveer un entrenamiento básico en algunos de sus procedimientos. Algunos ejemplos llevados a cabo, se describen a continuación:

A. Proyecto: “Teorías y tecnologías en computación del diseño: generando diseños y fabricando estructuras” del LAPAC – Laboratório de Automação e Prototipagem para a Arquitetura e Construção de la Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Urbanismo en la Universidad Estatal de Campinas, Brasil. Se exponen 6 ejercicios de estudiantes que se enmarcan dentro de los alcances investigativos del laboratorio que abordan los temas de dispositivos reactivos de fachadas o cerramientos, estructuras y mobiliario.

B. Proyecto: "Design de Precisão" del LED - Laboratório de Experiência Digital de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo en la Universidad Federal do Ceará en Fortaleza, Brasil. Este proyecto tiene como objetivo optimizar el *Cobogó*, un sistema constructivo tradicional compuesto por piezas perforadas de mampostería (arcilla o cemento), tradicional usado en el noreste de Brasil. Este sistema permite controlar el paso de la luz natural permitiendo a su vez la entrada de ventilación natural. Mediante un modelo paramétrico se optimizaron variables de sombreado y vientos por simulación para una localización geográfica específica, se analizan las posibilidades morfológicas de las piezas para cada fachada. Los resultados son prototipados en un modelo a escala, de piezas acrílicas que se puede observar en la figura 2-1 A.

C. Proyecto: “Casa Revista” del Lamo3D – Laboratório de modelos 3D e Fabricação Digital de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo en la Universidad Federal do Río de Janeiro, Brasil. Es un prototipo de vivienda basado en el sistema WikiHouse<sup>21</sup> (láminas

---

<sup>21</sup> WikiHouse es un proyecto colaborativo de investigación y desarrollo, desarrollado por la WikiHouse Foundation (con sede en el Reino Unido), que busca producir una revolución en la forma de producción de la vivienda. Se basa en la fabricación digital descentralizada, haciendo disponibles a manera de código abierto, diseños de bajo costo y complejidad y alto desempeño, para la manufactura y construcción de nuevas viviendas. Ver <http://www.wikihouse.cc/>

de madera contrachapada para ensamble simple cortadas con maquinaria cnc), que retoma algunos elementos típicos de la vivienda brasileña así como también propone algunas mejoras. Se desarrolló como ejercicio dentro del programa de posgrado en Urbanismo. Este prototipo, que se puede observar en la figura 2-1 B, hizo parte de un trabajo de grado.

D. Proyecto: “Casa Generativa” del SimmLab – Laboratório de Simulações e Modelamento em Arquitetura e Urbanismo de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Federal do Río Grande do Sul, Brasil. Este Workshop se enfocó en el desarrollo de un sistema generativo para producir un prototipo de vivienda de interés social. Durante el ejercicio se proyectaron sistemas de ensamble de elementos planos y prototipos a escala por corte láser. El prototipo final, que se observa en la figura 2-1 C, es fabricado a escala 1:1 mediante corte cnc de láminas de madera.

**Figura 2-1:** Prototipos realizados como parte de investigaciones.

A. “Design de Precisão.” B. “Casa Revista.” C. “Casa G.”



Fuentes: A. <https://www.youtube.com/watch?v=P478ZUms6oE> – B. [http://www.archdaily.com.br/br/tag/fau-ufrrj\\_revista\\_21.jpg?1442330683](http://www.archdaily.com.br/br/tag/fau-ufrrj_revista_21.jpg?1442330683) – C <http://casagenerativa.blogspot.com/co/>

E. El Área Computacional del Departamento de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María en Valparaíso, Chile presenta tres proyectos que se observan en la figura 2-2:

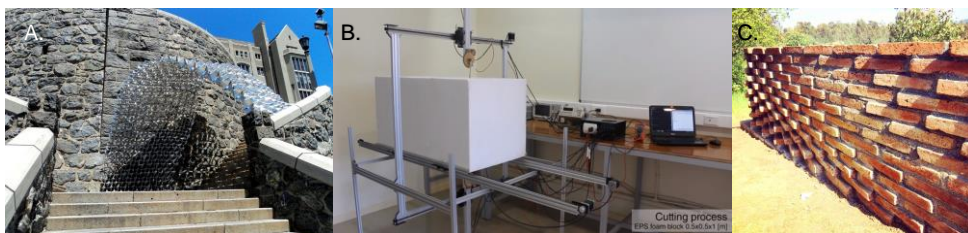
- Pabellón Botterfold como resultado del workshop “Precise Parametrics Permutations”. Desarrollo de un pabellón-cubierta en celosía situado sobre las escaleras de acceso al campus de la Universidad. Está compuesto por 1200 módulos de láminas de aluminio plegadas. A partir de ejercicios de plegado de cartón se exploraron cambios formales y de resistencia de movilidad de los pliegues. Se realizaron 3 definiciones

algorítmicas usadas para el desarrollo de las piezas e incorporación de detalles constructivos para el plegado, ensamble, remache e identificación de las mismas mediante un código único de posicionamiento grabado.

- Flex 7D: Superficies de espuma de doble curvatura por corte simple. Proyecto interdisciplinario entre los departamentos de arquitectura y electrónica de la misma universidad, que consistió en el desarrollo del prototipo de un dispositivo para el corte de piezas de doble curvatura, en espuma de polietileno expandido con un filamento caliente mediante en un único movimiento de la herramienta. Se cortaron piezas que fueron empleadas como formaletas para elementos de concreto. Otros usos potenciales incluyen mampostería liviana, panelería divisoria, cielorrasos, mobiliario, entre otros.
- Workshop “Muros de ladrillo fiscal de aparejo algorítmico”. Ejercicio grupal de construcción manual de muros de mediana altura con ladrillos artesanales, en donde se plantea la exploración de aparejos o apilamientos no convencionales de piezas de mampostería, a partir de un modelo paramétrico donde se exploran relaciones dadas por reglas y restricciones, lo que constituye su origen algorítmico.

**Figura 2-2:** Pabellones y prototipos realizados durante workshops y asignaturas.

A. Pabellón Botterfold. B. Prototipo Flex 7D C. Prototipo muro de ladrillo fiscal de aparejo algorítmico.



Fuentes: A. <http://www.archdaily.co/co/02-191825/botterfold-taller-precise-parametrics-permutations> - B. [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=98&v=cB1lkPgyijY](https://www.youtube.com/watch?time_continue=98&v=cB1lkPgyijY) – C. <http://www.archdaily.co/co/756587/estudiantes-construyen-muros-de-ladrillo-en-disposicion-algoritmica>

F. Pabellón “DIGFABMTY 1.0”, de la Facultad de arquitectura del Instituto Tecnológico de Monterrey (Campus Monterrey) - Monterrey, México, que se



---

puede observar en la figura 2-3 A. Ejercicio final de semestre de la asignatura "Tecnología Avanzada en la Arquitectura" en donde se desarrollaron dos algoritmos: uno para la generación de un módulo piramidal adaptable a la subdivisión de una superficie tipo bóveda para el pabellón, que introduce además diferenciación del mismo mediante perforaciones variables, y otro algoritmo que facilita el desarrollo de las piezas de cada módulo sobre el plano para el corte de las mismas por láser. El proceso de ensamble se realizó manualmente uniendo las piezas con grapas industriales y cinchos. La estructura es soportada y reforzada mediante cinco arcos de PVC anclados al suelo.

- G. Workshop "Hyperthreads" en la Facultad de Arquitectura del Instituto Tecnológico de Monterrey (Campus Santa Fé) en México D.F, México, que se puede observar en la figura 2-3 B. Replicando las experiencias de workshops similares de los mismos docentes en otros países como China e India, en donde se construyeron pequeñas estructuras de cáscara delgada en concreto con encofrados a partir de telas, a partir del aprendizaje y la aplicación de conocimientos locales sobre el mismo tema, en este ejercicio se desarrolló una estructura similar. Se emplearon encofrados en estructura seccionada "tipo waffle" (láminas de madera cortadas por cnc) y confinada en sus bordes mediante tubos de acero. Si bien el proceso constructivo fue de ejecución manual, un flujo de trabajo digital de generación de la forma y su optimización estructural y material mediante Análisis de Elementos Finitos, fue establecido inicialmente.
- H. Workshop "Robótica en Arquitectura" en el Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica de la Universidad Iberoamericana y el FabLab Puebla (miembro de la red del MIT), ejercicio que se puede observar en la figura 2-3 C. Mediante un ejercicio práctico los estudiantes fueron familiarizados con la manipulación de un brazo robótico y su control paramétrico. Se desarrolló un prototipo compuesto por módulos variables en tamaño y forma que en conjunto conforman una teselación a partir de una superficie de revolución. Los módulos de poliestireno expandido, fueron cortados con un marco de alambre caliente controlado por el brazo robótico.

**Figura 2-3:** Pabellones y prototipos realizados durante workshops.

A. Pabellón “DIGFABMTY 1.0.” B. Pabellón “Hyperthreads” C. Ejercicios del workshop “Robótica en arquitectura.”



Fuentes: A. <http://www.archdaily.mx/mx/760111/digfabmty> - B. <http://mexico.zha-code-education.org/> - C. <https://www.youtube.com/watch?v=wRu5kFNpJiw>

## 2.2 Diseñadores

A pesar de que, a la fecha, no se hallan investigaciones en donde se recopile y analice la producción y resultados de la implementación de herramientas de diseño computacional y fabricación digital en la práctica arquitectónica y constructiva en Latinoamérica, sí es posible evidenciar que estos aportes ya se emplean en aplicaciones puntuales. Aunque del mismo modo, se puede afirmar que esto se viene produciendo a un ritmo muy lento.

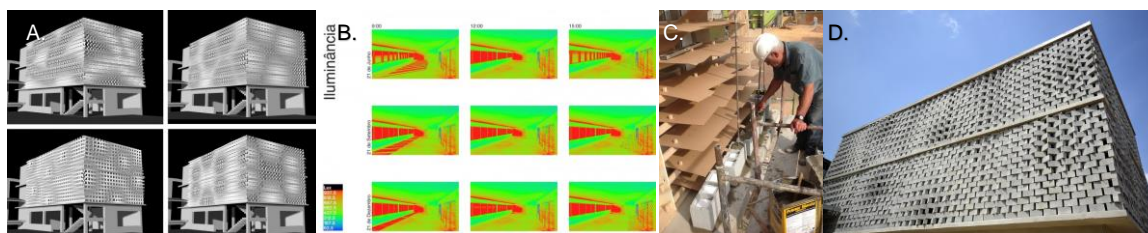
Hasta ahora, en la región se detectan muy pocas oficinas de arquitectos que dominen el tema y que por lo tanto empleen un método de trabajo o tengan una oferta de servicios basados ampliamente en herramientas y técnicas de diseño computacional. Igualmente, también son pocas las aplicaciones realizadas en proyectos construidos. No obstante, se puede hablar de ciertas áreas de aplicación específicas que son relevantes en la construcción, que son las siguientes:

- Diseño, optimización, manufactura e instalación de componentes para fachadas.
- Diseño, manufactura e instalación de revestimientos para espacios interiores.
- Diseño, manufactura y/o ensamble de mobiliario para interiores y exteriores.

De la primera área es relevante la producción arquitectónica del estudio brasileño SubDV, la cual se caracteriza por la combinación de herramientas y métodos de alta y baja tecnología, con el fin de generar geometrías ambientalmente reactivas, de sus proyectos se destaca “coBLOGó”, que se observa en la figura 2-4. Se trata de una

fachada de mampostería pensada como dispositivo de control solar para un espacio anexo a otro de oficinas y fábrica. Diferentes opciones fueron generadas mediante un proceso de modelado paramétrico y su desempeño fue evaluado con base en simulaciones de iluminancia. Posteriormente con herramientas de fabricación digital, se elaboraron plantillas guía en cartón, para orientar al personal de obra en el procedimiento de mampostería, ya que el posicionamiento de los ladrillos variaba según ángulos de rotación determinados para cada pieza en cada hilada, a fin de reproducir el efecto visual y el desempeño esperados.

**Figura 2-4:** “coBLOgó,” aplicación de diseño computacional en proyectos construidos. (De izquierda a derecha) A. Opciones de diseño. B. Simulación de iluminancia de luz natural. C. Proceso constructivo. D. Fachada terminada.



Fuente: <http://www.subdv.com/>

En el mismo grupo, cabe mencionar algunos proyectos puntuales del estudio mexicano Rojkind arquitectos, ubicados en Ciudad de México, que se observan en la figura 2-5. Estos edificios permiten evidenciar el uso de los medios digitales tanto en el diseño, mediante el modelado paramétrico para la racionalización de componentes y algoritmos generativos para producción de efectos formales y visuales, como en la manufactura, a través de maquinaria cnc para cortes, perforaciones, punzonados y dobleces de láminas metálicas. Para el desarrollo de los mismos, se ha contado con la participación tanto de estudios especializados en diseño computacional, como con empresas de consultoría de fachada que orientaron además en los procesos logísticos de montaje de los elementos de las fachadas. No obstante, en ninguno de estos proyectos las empresas o especialistas son de la región.

**Figura 2-5:** Diseño computacional y fabricación digital en proyectos de la región.

A. Fachada y cubierta Cineteca Nacional. B. Fachada restaurante Tori Tori. C. Fachada de centro comercial Liverpool. El modelado paramétrico de las fachadas para la tienda y el restaurante estuvo a cargo de los arquitectos Robert Stuart-Smith y Roland Snooks, la consultoría para el desarrollo fue realizada por la empresa norteamericana Studio NYL.

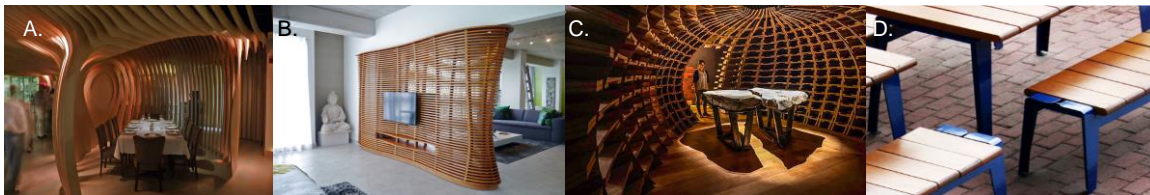


Fuentes: A. <http://www.archdaily.com/478325/cineteca-nacional-s-xxi-rojkind-arquitectos> -  
 B. <http://www.archdaily.com/187115/tori-tori-restaurant-rojkind-arquitectos-esrawe-studio-2> -  
 C. <http://www.robertstuart-smith.com/>

Las otras dos áreas, sobre revestimientos para interiores y desarrollo de mobiliario respectivamente, están compuestas por pequeños estudios de reciente conformación, cuyo campo de acción incluye, pero no se limita a esas dos mismas aplicaciones. Dentro de estas empresas, se puede mencionar a la puertorriqueña Constructo Digital, de la que se destacan los proyectos de revestimiento para el restaurante “Nuovo Perugino” y el muro divisorio “The Spline”; la brasileña Protobox con la colección de mobiliario para exteriores “Dobrá”; y la chilena CNC Studio, con desarrollos más escultóricos como el “Espacio FA en el Hotel Noi” (junto a la arquitecta chilena Verónica Arcos) y el cielorraso “Flat Hex” para una sala de ventas automotriz, desarrollada para el colectivo chileno de arquitectura, diseño y arte “Gt2p”, proyectos que se observan en las figuras 2-6 y 2-7.

**Figura 2-6:** Ejemplos de aplicación en espacios interiores y mobiliario.

A. “Nuovo Perugino” San Juan, Puerto Rico. B. “The Spline” San Juan, Puerto Rico. C. “Espacio FA Hotel Noi” Santiago, Chile. D. Mobiliario “Dobrá.”

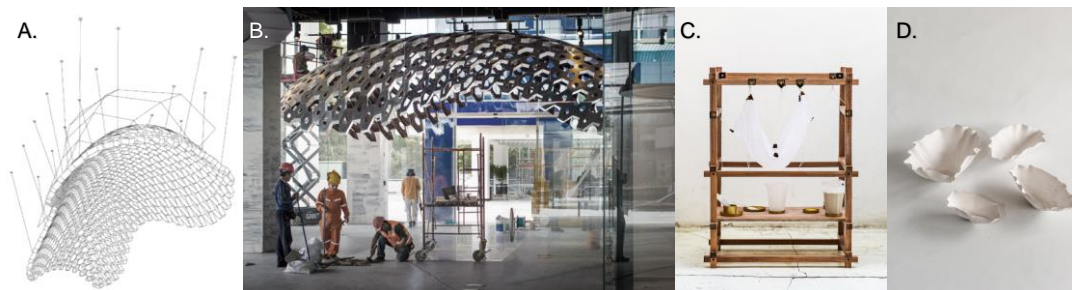


Fuente: A. y B. <http://constructodigital.com/> – C. <http://www.cncstudio.cl/> – D. <https://www.youtube.com/watch?v=6CX8WCbQcyQ>

Vale la pena incluir este último colectivo dentro de este grupo de la clasificación, ya que, si bien su producción no está relacionada con la construcción, si se basa en la investigación y experimentación con nuevas tecnologías digitales de diseño y producción, a fin de establecer un dialogo entre lo artesanal y lo industrial mediante el enriquecimiento de lo local, expresado en técnicas y materiales tradicionales. Un ejemplo patente de ese enfoque, se observa en el proyecto “impresora catenaria de cerámica Less N° 1”, (ver figuras 2-7 C y D) el cual se trata de un experimento sobre “cómo crear máquinas estándar que generen resultados no-estándar, mezclando control numérico análogo con materiales y técnicas tradicionales integrados en un proceso en tiempo real, sugiriendo que el diseño paramétrico no es necesariamente una metodología computacional.”<sup>22</sup> Proyectos como este, hacen pensar en formas de apropiación tecnológica a partir de recursos locales, orientados hacia la resolución de necesidades propias.

**Figura 2-7:** Otros ejemplos en espacios interiores y de apropiación tecnológica.

A. y B. “Flat Hex” esquema de anclaje. B. “Flat Hex” proceso de ensamble en sitio. C. Impresora cerámica “Less N°1.” D. Piezas de cerámica creadas con la impresora.



Fuente: A. C. y D. <http://gt2p.com/> - <http://shape.cl/>

## 2.3 Consultores y fabricantes

Del mismo modo que como ocurre con la producción en diseño, en los sectores de la consultoría y de la producción industrial para la construcción, tampoco se observan registros investigativos que evidencien lo que está ocurriendo con las tecnologías digitales. Una búsqueda a partir de datos técnicos en proyectos arquitectónicos reconocidos tanto a nivel mundial como en la región, ha permitido recopilar información

<sup>22</sup> Fuente: <http://gt2p.com/Less-CPP-N-1>

sobre un reducido número de empresas que prestan servicios de consultoría, fabricación e instalación de elementos o componentes constructivos, haciendo uso intensivo de la manufactura digital, en donde nuevamente, se observa una marcada tendencia hacia el desarrollo de fachadas.

Dentro de las compañías más reconocidas se encuentra “Kinética”, un grupo de diseñadores industriales de México, que ofrece soluciones personalizadas de manufactura de componentes o estructuras no estándar, para una variedad de aplicaciones arquitectónicas, como por ejemplo sistemas de revestimiento de fachada o elementos de ventanería, entre otros. Haciendo uso intensivo de un muy completo grupo de herramientas fabricación digital que incluyen un brazo robótico de 6 ejes. Esta empresa cuenta con un amplio portafolio de servicios, que va en algunos casos desde la concepción del diseño, pasando por su modelado y parametrización, hasta llegar a la manufactura e instalación o ensamble en sitio.

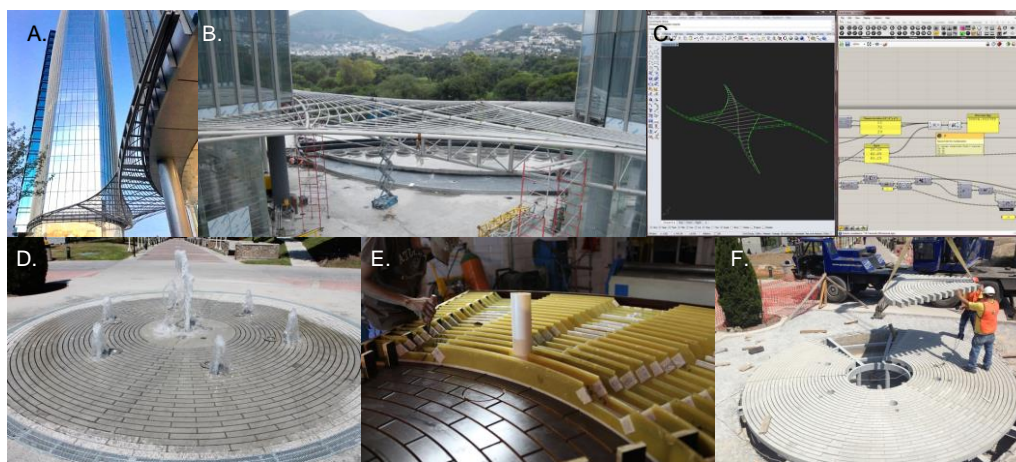
En esta empresa se ha trabajado, además, con una amplia paleta de materiales que incluye desde maderas, piedras, vidrio y resinas, hasta compuestos como fibra de vidrio y concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRC por sus siglas en inglés). Dependiendo de la naturaleza de cada proyecto y los materiales a trabajar. Las aplicaciones más frecuentes se encuentran en la manufactura de piezas, prototipos para aprobación a escala real (o *mock up*, como también se les conoce), moldes para piezas o elementos guía para otras labores (por ejemplo, plantillas para soldadura de elementos en ángulos irregulares), sin dejar de lado, los procesos de planificación y logística de procedimientos constructivos asistidos digitalmente, que para cada proyecto se requieren.

Con todo esto, esta empresa ha logrado consolidar un diverso rango de proyectos tanto fuera de Latinoamérica, como dentro de ella. De los construidos en la región, que se pueden observar en la figura 2-8, y que por su complejidad geométrica y logística constructiva ameritan considerarse destacados, se incluyen: “Equus 333”, una pérgola sobre la vía de acceso vehicular a un complejo de edificios, que debía considerar la longitud, grado de curvatura y uniones de sus piezas, para amoldarse a la geometría curva de las fachadas de los edificios existentes.

Así mismo, se destaca el desarrollo de un sistema modular de un piso permeable en concreto para una fuente ornamental, en donde se debieron resolver problemas de estancamiento del agua y de capacidad de carga de los elementos, dado el tránsito de vehículos sobre la misma. La conceptualización de la propuesta de diseño por medio de modelado paramétrico, facilitó la modulación de elementos de la misma, así como la evaluación de su desempeño tanto en permeabilidad como en resistencia estructural, además de racionalizar la producción de una formaleta reutilizable, cuyas piezas se fabricaron por corte cnc.

**Figura 2-8:** Ejemplos de proyectos ejecutados por consultores y/o fabricantes.

A. y B. Pérgola “Equus 333” en proceso de instalación. C. Procesos de modelado paramétrico de la pérgola mediante Grasshopper. D. Fuente terminada. E. Formaleta en proceso de manufactura. F. Instalación en sitio de módulos de piso permeable para la fuente.



Fuente: A. <https://www.instagram.com/p/BIXrvAqgSQ4/> -  
B. C. D. E. y F. <http://www.kinetica.com.mx>

Al igual que esta empresa, la compañía “Geométrica” también de México, se dedica al diseño y desarrollo de cúpulas y estructuras espaciales para diversas aplicaciones arquitectónicas, industriales y de almacenamiento a granel. En esta empresa se han desarrollado una serie de sistemas constructivos a partir de estructuras espaciales que, mediante ensambles sencillos realizados con herramientas de fabricación digital, permiten la construcción de manera rápida y eficiente, de casi cualquier geometría, incluyendo las de forma libre. Las aplicaciones incluyen domos, bóvedas, cubiertas y fachadas de curvatura sencilla y doble, que logran abarcar grandes luces y alturas. Los

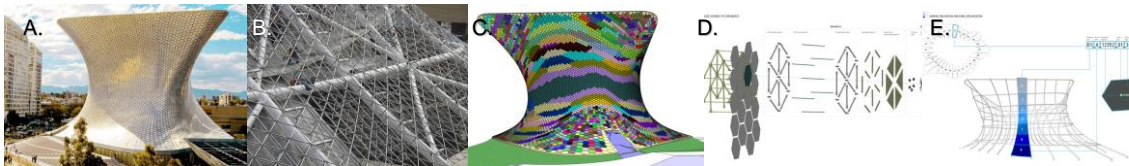
materiales empleados son tubos y uniones en aluminio o acero galvanizado, con algunas variaciones que permiten acoplar revestimientos en aluminio o vidrio.

Un reconocido proyecto construido en la Ciudad de México, que se observa en la figura 2-9, en donde se empleó uno de estos sistemas constructivos como subestructura de soporte del revestimiento de fachada, es el Museo Soumaya diseñado por la firma FR-EE del arquitecto mexicano Fernando Romero. Para su desarrollo constructivo, este proyecto contó con la asesoría de grandes compañías como Arup en la parte de ingeniería estructural y Gehry Technologies en el desarrollo de la ingeniería de fachada, entre otras empresas.

Esta última, estuvo a cargo del proceso de racionalización y refinamiento de la superficie de doble curvatura no desarrollable para la fachada, a través de un patrón geométrico compuesto por 16,000 paneles hexagonales de revestimiento en aluminio. Puesto que la forma del diseño original era inalterable, Gehry Technologies empleó su programa Digital Project, así como otros instrumentos digitales hechos a la medida, con el fin de conservar la intención de diseño original dentro de las restricciones constructivas del proyecto y simultáneamente brindar soporte al equipo de diseño, realizando análisis constructivos y generando la documentación 2d y 3d para la fabricación.

**Figura 2-9:** Aplicación de diseño computacional y fabricación digital en el Museo Soumaya.

A. Edificio terminado. B. Sistema “Hyparwave™” de Geométrica, como estructura de soporte del revestimiento. C. Racionalización y refinamiento de la superficie de revestimiento. D. Diagrama de ensamble de paneles de revestimiento. E. Diagrama de ubicación en la superficie por medio de código único para cada panel.



Fuentes: A. C. D. y E. <http://www.gehrytech.com/> - B. <http://www.geometrica.com/>

Por otro lado, en Argentina la compañía Dante Tisi cuyos orígenes se remontan hasta 1886 como una empresa especializada en diversos oficios con el metal y la cerámica, llegó a crecer rápidamente, consolidando una gran reputación en su país al fabricar y construir las cubiertas de algunos de los edificios más emblemáticos de Buenos Aires. A

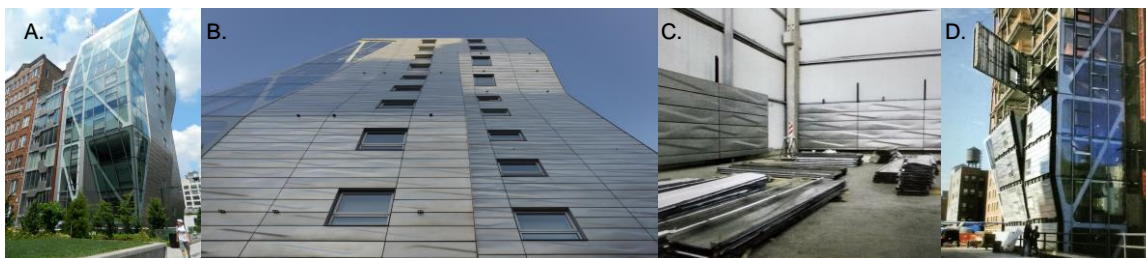


partir de 1996 una diversificación en el sector de edificios industriales mediante la manufactura de paneles térmicos hizo expandir a la compañía, llevándola en 1999 al mercado norteamericano, pudiendo dedicarse también a la fabricación personalizada de trabajos en metal para edificaciones especializadas de alto perfil.

Desde el año 2007 la compañía se enfoca únicamente en este segmento del mercado, lo que la ha llevado a participar en la fabricación de elementos para sistemas de fachadas ventiladas a medida para algunos proyectos en Estados Unidos, dentro de los que se destaca el proyecto “HL23”, el cual se observa en la figura 2-10. Se trata de un edificio residencial ubicado en Nueva York, diseñado por el arquitecto norteamericano Neil Denari. Para este proyecto se fabricaron paneles en acero inoxidable de gran tamaño, estampados con un patrón personalizado logrado mediante técnicas de diseño generativo. Un proceso continuo de medición de los pórticos estructurales de acero del edificio, se debió llevar a cabo para lograr que el tamaño final de los paneles estuviera dentro de las tolerancias aceptables, procurando mantener las condiciones de juntas paralelas y de co-planaridad entre los mismos.

**Figura 2-10:** Procesos de fabricación digital en un proyecto fuera de la región.

A. Revestimiento de fachada del edificio “HL23”. B. Detalle de los paneles. C. Prueba en ensamble en taller, se emplearon sólo tres paneles base para conformar el patrón gráfico. D. Proceso de montaje en obra.



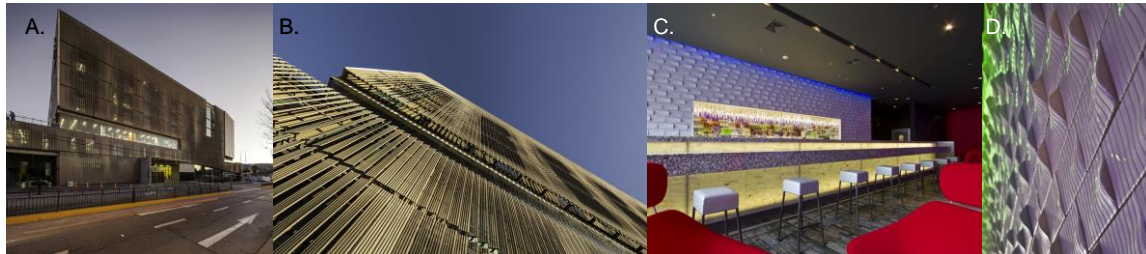
Fuentes: A. <http://newyork.thecityatlas.org> – B. <http://projects.denari.co/> – C. (Denari, 2012).

En una escala menor y más centrada en lo local, la empresa chilena Shape, se ha especializado en el desarrollo de productos arquitectónicos personalizados en los que se desea incorporar piezas únicas de alta complejidad. Sus principales aplicaciones han sido fachadas y revestimientos interiores, incluyendo cielorrasos. A partir de procesos de corte, perforación y doblez por medio de maquinaria cnc, han explorado en los tres campos mencionados, a través de técnicas como seccionado, plegado y conformado.

Esta empresa desarrolla las ideas y conceptos de sus clientes en un producto específico, que posteriormente fabrican e instalan, tal y como los que se pueden observar en figura 2-11.

**Figura 2-11:** Otras aplicaciones en fachada y espacios interiores.

A. Fachada UNAB. B. Detalle de la fachada. C. Paneles de revestimiento “soplido discretizado.” D. Detalle de sus piezas.



Fuente: <http://shape.cl/>

Para el proyecto de la fachada de la UNAB, en Viña del mar, se creó un algoritmo que, ponderando la iluminación natural sobre el efecto visual en la fachada, permitiera orientar la visual desde el interior hacia una playa cercana. Se empleó un sistema industrializado de láminas de aluminio microperforado, que requirió ser flexibilizado en su mecanismo de fijación, con el fin de lograr torsiones en sus elementos en los ángulos deseados, de acuerdo con el algoritmo creado. Previo a su construcción se fabricó un *mock up* para verificar la cantidad de giro admisible y deformación de los elementos.

En el proyecto del revestimiento de muro, se dio forma a la idea original del diseñador de producir un efecto visual que se asemejara a un soplido sobre la superficie. Se produjeron siete módulos de moldes en MDF por corte cnc, con variaciones en su forma para dar la sensación de movimiento. Con estos moldes se termoformaron las piezas finales a partir de láminas de plástico ABS.

Como se ha observado a través de los ejemplos estudiados, en distintas partes de Latinoamérica, diseñadores y fabricantes han empezado a encontrar en la fabricación digital y el diseño computacional, recursos valiosos para el desarrollo en diversas escalas, de algunas aplicaciones para la construcción. Con esas herramientas, nuevas posibilidades de innovación en aspectos tanto funcionales como estéticos empiezan a surgir. Si bien, en algunos casos se ha requerido asistencia de especialistas extranjeros

con mayor experticia en algunos aspectos técnicos -por ejemplo, el desarrollo de software para la racionalización de la superficie del Museo Soumaya por Gehry Partners- en otros, el aporte importante proviene de la región y se dirige a contextos incluso más avanzados, como es el caso de “Dante Tisi” para el revestimiento de fachada para el edificio “HL23”.

## **2.4 Perspectiva del autor**

A pesar de los factores mencionados, que limitan la expansión de la fabricación digital en la región, tanto en la investigación como en la aplicación se reconocen varios esfuerzos que están ayudando a que este proceso se consolide, si bien la relación academia-industria, aún no ha tomado forma en este campo.

En el ámbito académico, tanto en investigación como enseñanza Brasil, Chile y México - con especial énfasis en el primero- tienen una mayor experiencia sobre los demás países de la región, en donde se evidencian importantes aportes en la relación entre diseño computacional, fabricación digital y su relación con la construcción. Se observa que en la gran mayoría de las instituciones se abordan temas, problemáticas, procedimientos, técnicas, herramientas y maquinaria similares.

Por ejemplo, en algunas de las investigaciones encontradas, se diseñaron, fabricaron y ensamblaron prototipos a escala real de vivienda de bajo costo y facilidad constructiva, a partir del uso de materiales laminares como aglomerados de madera, que fueron procesados por corte láser o cnc (Casa Revista, Casa Generativa, Woka). Se evidencia en ellos, la preocupación por el aporte de soluciones a un problema social ampliamente conocido en la región, la crisis habitacional, en donde la facilidad, rapidez y economía en la construcción, podrían convertirse en factores determinantes en la dirección hacia su superación.

Así mismo, cabe destacar también otras investigaciones que apuntan a proponer soluciones puntuales a temas más específicos, como la implementación del prototipado rápido (impresión 3d) como instrumento de representación y estrategia de comunicación entre el diseño y la obra o también, la implementación de procesos productivos y flujos de trabajo file-to-factory, a partir del uso de los equipos de fabricación digital que se

tienen a disposición. En algunos casos se contó con cortadoras cnc, en otros, con equipos más capaces como brazos robóticos. En todos ellos, la finalidad siempre fue la exploración de procesos constructivos que involucran geometrías complejas que de otro modo no habrían podido ser exploradas.

Desde el punto de vista pedagógico, se destacan los workshops como un método didáctico de enseñanza a pesar de su corta duración -por lo general una semana- en ellos se expone a los estudiantes a ambientes de aprendizaje cercanos a la realidad de la construcción a través de estrategias de trabajo colectivo, a la vez que permiten la experimentación de primera mano con las herramientas, materiales y técnicas de diseño y fabricación. Además, de esta forma se está dando mayor difusión al tema de la fabricación digital en la academia, a la vez que se complementa la actualización de conocimientos y habilidades para nuevas generaciones de arquitectos.

Por otra parte, los grupos de diseñadores y consultores y de fabricantes, al ser un número muy pequeño de organizaciones en ambos casos y con una producción aún muy escasa, evidencian el nivel incipiente en el que se encuentra la implementación del diseño computacional y la fabricación digital en el diseño y la construcción. No obstante, algunos de los proyectos que han sido llevados a cabo por estas oficinas o empresas, permiten vislumbrar el potencial que hay en la región en cuanto a la apropiación técnica y tecnológica, en respuesta a condiciones locales.

Aún, sin embargo, se requiere una mayor profundización en cuanto a técnicas, especialmente en el manejo de interfaces textuales de programación, por ejemplo, RhinoScript, de forma paralela a como se ha hecho con las de interface gráfica como Grasshopper, como lo demuestra Herrera (2013), donde ya desde los entornos académicos se ha empezado a generar una dependencia de estas últimas, aun cuando las primeras han probado ser de mayor versatilidad para los procesos de fabricación.

En general, todo lo anterior podría señalar derroteros para la generación de nuevas propuestas tanto en lo estético como en lo funcional y así explorar otros campos de aplicación dentro de la construcción, más allá de los observados hasta ahora -elementos para fachadas, revestimientos interiores y mobiliario-. La integración de enfoques tales como el diseño basado en el desempeño, el análisis del comportamiento de materiales

existentes o nuevos, la producción de algoritmos generativos, así como la experimentación con combinaciones entre técnicas de fabricación digital (seccionado, plegado, teselado, contorneado y moldeado), podrían generar aportes hacia la consecución de dicho objetivo.

No obstante, es evidente que prevalece un desconocimiento de estos temas por parte de una gran mayoría de arquitectos diseñadores de la región. Este puede ser uno de los factores que más limitan la proposición de diseños constructivamente innovadores y desafiantes, cuya materialización sería viable de manera eficiente y racional mediante las herramientas digitales. De igual forma, la creación de nuevas empresas de consultoría y manufactura en la región, podrían promover tales avances.



## **3. Análisis del Contexto Local**

Este capítulo abordará el tema de la implementación de las herramientas de diseño computacional y de fabricación digital para la construcción en el contexto colombiano. Inicialmente se estudiará de forma retrospectiva el tema de la prefabricación y sus métodos de producción en Colombia, como antecedente en la construcción dentro del mismo contexto, partiendo de la base de lo expuesto en los capítulos anteriores, en donde se puede entender la fabricación digital como un modelo de producción similar a la prefabricación, pero también donde el primero supera ampliamente varias de las limitaciones inherentes del segundo. Posteriormente se estudian algunos de los ejemplos encontrados en el contexto local, dentro de tres categorías de análisis, a modo de análisis introspectivo.

Por último, se describe el diseño metodológico empleado en este trabajo, junto con los resultados de su aplicación, cuya finalidad es obtener información que permita comprender cuáles han sido los factores que promueven o impiden una implementación más rápida de los recursos digitales en el diseño y la construcción.

### **3.1 Antecedentes en la construcción**

Aun cuando los orígenes de la prefabricación pueden llegar a ser tan antiguos como la actividad misma de la construcción, si se entiende como la producción en serie de componentes constructivos fuera del sitio de la obra, la prefabricación en Colombia, como producción de esos mismos elementos en una fábrica o taller de manera industrializada, tiene sus orígenes en la segunda mitad del siglo XX. Esta fue el resultado de una tendencia global fuertemente establecida por la arquitectura moderna, heredada de países como Francia y Alemania, que como consecuencia de la guerra debían

procurarse sistemas constructivos rápidos y eficientes para reconstruir sus ciudades y redes de infraestructura.

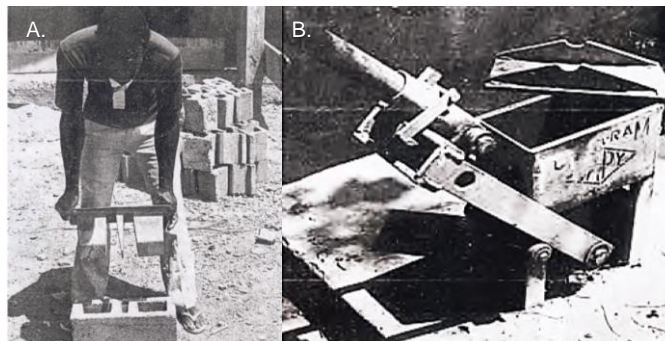
Desde ese entonces la prefabricación en Colombia ha estado, por una parte, ligada al desarrollo de la vivienda como una respuesta tecnificada a la alta demanda habitacional en las ciudades, sobretodo en la búsqueda de una construcción acelerada y reducida en sus costos, y por otra parte, al uso del concreto, puesto que en ambos aspectos uno de los objetivos a conseguir dadas las múltiples ventajas de este modelo de producción, era la de lograr una economía de escala en la manufactura de componentes.

Sin embargo, en el país, la vivienda no ha sido el único uso en el que han sido empleados componentes prefabricados y del mismo modo, el concreto no ha sido el único material empleado para este fin. Otros usos y materiales también explorados, tienen como denominador común con los prefabricados de concreto, a la coordinación modular de los elementos. El desarrollo de elementos prefabricados en el país, se ha dado fundamentalmente a través de dos métodos: los artesanales y los industriales. En los primeros, se han empleado materiales como el adobe, la arcilla cocida y el concreto. Por tratarse de un proceso de baja tecnología, se emplea mano de obra y moldes comúnmente hechos de madera o metal.

Uno de los ejemplos más conocidos en Colombia fue la prensa manual CINVA-Ram, que se observa en la figura 3-1, ideada en los años cincuenta por el ingeniero Raúl Ramírez en el Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento Urbano (CINVA). Con esta máquina se prensaban o comprimían unidades o bloques macizos de mampostería, compuestos por una mezcla de tierra y cemento. Sin embargo, un modelo de producción de este tipo, se ve limitado al momento de tener que producir grandes cantidades de piezas, al máximo de las que puede producir un operario en una hora, además de obtener una variación en las mismas por ser un proceso manual y por la misma condición heterogénea del material orgánico.



**Figura 3-1:** Medios de producción artesanal para prefabricados de mampostería en Colombia. A. Molde para bloques de suelo-cemento. B. Prensa CINVA-Ram.

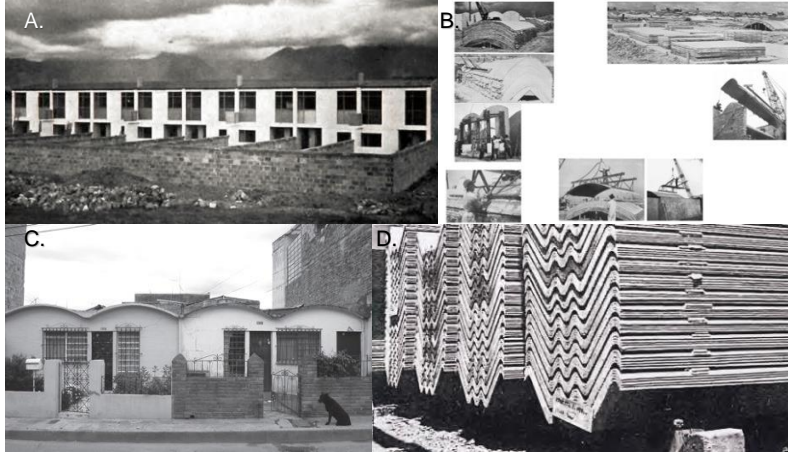


Fuente: (Hurtado, 2011).

En cuanto a los sistemas industriales, la historia se remonta también a los años cincuenta, cuando el sistema *Vaccum Concrete*, fue introducido a Colombia por el arquitecto Álvaro Ortega, quien estudió sobre la prefabricación con Walter Gropius y Marcel Breuer. Este sistema fue concebido por el ingeniero sueco K.P. Biller, y posteriormente empleado por la armada norteamericana, para convertirse más tarde en uno de los más difundidos a nivel global. Su objetivo es la disminución del peso y la cantidad de concreto empleado, mediante la extracción del aire de la mezcla, con lo que además se obtiene un material impermeable.

El aporte de Ortega consistió en lograr mayor economía en la producción de elementos para la construcción de viviendas. Para ello experimentó añadiendo materiales naturales como azufre y ceniza volcánica, pero diseñando elementos siempre dentro de un estricto sistema de coordinación modular. Una muestra de su trabajo y del sistema se puede observar en las viviendas de los barrios Quiroga y Muzú en Bogotá, que se observan en la figura 3-2, en donde inclusive se prefabricaron las cimentaciones. Otro elemento prefabricado con este sistema muy reconocido de sus diseños, fue la teja canal de asbesto-cemento (Hurtado, 2011).

**Figura 3-2:** Obras ejecutadas con elementos prefabricados industrializados en Colombia. A. Barrio Muzú. B. Fabricación y montaje de cubiertas abovedadas en concreto. C. Vivienda terminada en el barrio Quiroga. D. La teja canal de asbesto-cemento de Ortega, permitía menores pendientes y mayores luces entre apoyos.



Fuentes: A. y D. (Hurtado, 2011) – B. y C. <http://portfolios.uniandes.edu.co/gallery/26602291/Sem-Historia-de-la-Arquitectura-Colombiana-2015-I>

Otros sistemas industriales de prefabricación que han sido empleados en el país, tienen que ver con la manufactura de elementos estructurales de concreto tales como vigas, entresijos, placas nervadas (por ejemplo, el sistema ideado por el ingeniero Doménico Parma) y otros elementos de concreto pre esforzado y pretensado, así como también piezas de mampostería y para fachada tipo celosía en arcilla cocida. Estas dos últimas, respectivamente, a través de la utilización de métodos como grandes moldes metálicos subdivididos en su interior para producir grandes cantidades y maquinaria de extrusión, es decir, maquinaria en la que el material en estado fluido se hace pasar de forma lineal, a través de un troquel fijo para que tome la forma deseada. En estos casos, la maquinaria reemplaza en buena parte del proceso, a la mano de obra que, no obstante, la debe asistir en calidad de operario, con el fin de suplir la materia prima necesaria y estar a cargo de la supervisión y el control de calidad.

Por otra parte, en la construcción local también se han empleado sistemas constructivos metálicos, que, por su naturaleza de producción, **se pueden entender como sistemas prefabricados, puesto que se construyen a partir del ensamble de elementos producidos de forma masiva y estandarizada**, tanto en sistemas de estructura portante, como en elementos de cerramiento (fachadas, cubiertas, sistemas de soporte o

---

anclaje) u otros (mobiliario). Su inserción en Colombia se remonta al siglo XIX en proyectos de infraestructura, por ejemplo, para los puentes sobre el río Apulo (por Thomas Reed en 1852) o el Magdalena en Girardot (por Francisco Cisneros en 1881) y también en edificaciones de arquitectura industrial, como las de los ingenios azucareros del Valle del Cauca, la fábrica de Bavaria en Bogotá (en 1890) o las primeras plantas de energía junto al río Bogotá. En estos dos últimos casos, se emplearon elementos estructurales importados desde Alemania y Francia respectivamente.

Hasta mediados del siglo XX, todavía se haría de la misma manera, importando elementos estructurales en estos casos desde Estados Unidos para algunos proyectos de edificaciones en altura, principalmente de instituciones bancarias (Edificios Pedro A. López, Banco de Bogotá y Banco de Colombia, todos en Bogotá). Pero solamente “a finales de la década de los 40 se comienzan a construir edificios de acero en Colombia gracias a la creación de las primeras empresas dedicadas al diseño, fabricación y montaje de estructuras metálicas” (Pinto, 2010).

Aun cuando ventajas como rapidez, ligereza o limpieza hacen de la construcción metálica en Colombia, un competidor aventajado frente a otros sistemas constructivos tradicionales y otros prefabricados, la construcción metálica no ha tenido un efecto disruptivo en el medio, en donde por el contrario en años recientes, algunos arquitectos han buscado la manera de integrar en modos interesantes, elementos y sistemas metálicos con materiales más tradicionales e incluso de la arquitectura vernácula. En palabras del arquitecto Hernando Vargas (2010), en la actualidad “asistimos a un innegable cambio de medios y modos de pensar como lo comprueba la amplia y diversa expansión de la construcción metálica en Colombia.”

De esta forma, tras analizar algunos de los medios y técnicas más importantes de la prefabricación en Colombia, desde su historia hasta el presente, se comprende que, **si bien este modelo productivo no ha sido completamente ajeno a la actividad constructora en el país, tampoco es un modelo totalmente consolidado**. Ha tenido un rol más bien complementario a los modelos de producción ya establecidos, dentro de la construcción en Colombia. La tecnificación del desarrollo de productos prefabricados en Colombia, avanza más por el lado de los materiales (hoy en día ya es posible contar con componentes producidos en serie, realizados en concreto reforzado con fibra de

vidrio GFRC o concretos de alto desempeño HPC), que incluso de la misma maquinaria y sus procedimientos.

### **3.2 Estado actual de los medios digitales en diseño y construcción**

En el caso de Colombia, hasta ahora es muy poca la información que se ha producido al respecto a la implementación, por un lado, del uso del computador en los procesos de diseño arquitectónico, y por otro, de la fabricación digital en la construcción. No se hallan hasta el momento registros sobre el tema, para tomar como punto de partida, lo cual dificulta tanto los procesos de registro histórico y evolutivo, como de elaboración de un diagnóstico más preciso sobre su estado actual en el país. No obstante, sí es posible rastrear los inicios del uso del CAD y la maquinaria cnc en el país, por lo menos para la industria metalmecánica. De acuerdo con Valero (1999), la maquinaria cnc se introdujo alrededor de 1985 y el CAD llegaría seis años más tarde a ese mismo sector, aunque con propósitos netamente de representación gráfica, no se buscó su integración en procesos CAM.

Aun así, ciertos hallazgos puntuales, arrojan algunas pistas sobre este tema en particular, al que esta investigación enruta a través de las tres categorías ya empleadas en el análisis regional, pero con la inclusión de iniciativas independientes dentro de la primera de ellas, así: instituciones educativas e iniciativas independientes; diseñadores; y consultores - fabricantes.

- Instituciones académicas e iniciativas independientes

En el entorno académico colombiano resulta “evidente la poca influencia que estas tecnologías están teniendo en los micro-currículos de los programas de arquitectura” (Velasco, 2011), esto ocurre a causa de la resistencia de los docentes a las tecnologías digitales, puesto que, de acuerdo con Çil y Pakdil (2007) ello se debe al “temor a la pérdida de dominio de técnicas manuales de representación por parte del estudiante, y parcialmente en el desconocimiento de las posibilidades que brindan estas herramientas más allá de su uso como instrumentos de representación” (Velasco, 2011).

Dicho desconocimiento, reduce las oportunidades de experimentación que estos recursos brindan, ya que los mismos aún no han llegado a tener la difusión necesaria para su aprovechamiento masivo, limitando las posibilidades para explorar propuestas diferentes en arquitectura y construcción. Una recopilación de las implementaciones de FabLabs en el país, que se pueden observar en la ver Tabla 3-1, asociados a instituciones educativas, así como también por iniciativas independientes, permite evidenciar el estado incipiente del tema.

**Tabla 3-1:** Laboratorios de fabricación en instituciones académicas o como iniciativas independientes en Colombia.

Nombre	Fundación	Ubicación	Afiliaciones	Vocación
Tecnoparques del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)	2007	Bogotá	Red MIT	Programas de capacitación en tecnologías de manufactura avanzada / Apoyo al desarrollo de proyectos de innovación tecnológica
		Medellín		
Fab Lab Unal Medellín	2013	Medellín	Red MIT / Universidad Nacional de Colombia (Medellín)	Servicio estudiantil de prototipado / Capacitación (Fab Academy)
Fab Lab Cali	No Registra	Cali	Red MIT	Servicio estudiantil de prototipado / Promoción de la cultura "maker"/ Capacitación (Fab Academy)
FabStudio	No Registra	Medellín	Red McNeel / Universidad Pontificia Bolivariana	Servicio estudiantil de Prototipado (programa de Diseño Industrial)
Laboratorio Digital de Diseño Industrial y Taller de Diseño / Laboratorio de Ingeniería Industrial	2007	Cali	Universidad ICESI	Servicio de apoyo a asignaturas de Diseño Industrial / Servicio de apoyo a asignaturas de Ing. Industrial (sistemas avanzados de manufactura, simulación de procesos productivos).
Laboratorio Fabricación digital Arquitectura y Diseño	No Registra	Bogotá	Universidad de los Andes	Servicio estudiantil de Prototipado (Arquitectura y Diseño Industrial)

**Tabla 3-1:** (Continuación).

Lab Fab Ex	2014	Bogotá	Universidad Nacional de Colombia (Bogotá)	Investigación en tecnologías y procesos de manufactura avanzada y remota (Facultad de Ingeniería Mecatrónica - Grupo de Diseño y Manufactura - Automatización)
FabLab Colombia / El Maquinista	2008	Medellín	Red MIT	Arquitectura / Mobiliario / Prototipado/ Capacitación
Uno.Estudio (antes FabLab Bogotá)	No Registra	Bogotá	Red McNeel	Espacio comercial de renta para diseño y desarrollo de productos/ Servicio de Prototipado / Capacitación uso de equipos
Bogohack	2012	Bogotá	Independiente	Espacio de desarrollo / Prototipado / Capacitación / Fabricación de equipos
DosUno Design	En Planes	Bogotá	Independiente	Desarrollo de productos

Fuente: Elaboración propia

Igualmente, son aún muy pocas las líneas de investigación encontradas e investigaciones realizadas o en curso y todavía menos, aquellas con una metodología práctica con resultados demostrativos. De manera similar ocurre con la capacitación (workshops o cursos) en el tema, en donde la mayoría ocurre principalmente en los espacios de trabajo de las iniciativas independientes, confirmando así que el desconocimiento y posible desinterés, radica principalmente en las instituciones de educación formal. En general, los ejercicios desarrollados en estos talleres, algunos de los cuales se pueden observar en la figura 3-3, por su corta duración, apenas tienen un alcance introductorio sobre el tema, con lo que se evidencia, la falta de programas de mayor alcance y profundidad.

**Figura 3-3:** Algunos ejercicios fabricados a escala real.

A. "Digital house." B. "Rural house," fueron ejercicios desarrollados en los talleres FLOW (FabLab Open Workshop) versiones 2 y 3 de FabLab Colombia. C. "The Cocoon", ejercicio de un pabellón desarrollado en workshop con el arq. Andres Martín Pastor en el FabLab Unal Medellín. D. "Parametrisol", ejercicio de prototipo del proyecto "estética alternativa para envoltentes arquitectónicos" en la facultad de arquitectura de la Universidad del Valle.



Fuentes: A. y B. [www.behance.net/fablabcolombia](http://www.behance.net/fablabcolombia) - C. <http://thecocoonunalmed.weebly.com> – D. <https://sites.google.com/a/correounivalle.edu.co/proyectocreacion/home>

- Diseñadores

En el campo profesional colombiano, la aplicación de las tecnologías digitales en el proceso de diseño arquitectónico, tradicionalmente mantiene al computador como una herramienta exclusivamente para la producción de la representación gráfica del proyecto (visualización espacial y desarrollo de documentación arquitectónica y constructiva). Generalmente las tareas de análisis, simulación y optimización de variables específicas de desempeño (estructurales, ambientales, materiales, etc.), que podrían ser integradas al diseño como factores generativos del resultado arquitectónico, son dejadas en manos de terceros encargados de realizar estudios técnicos (estructural, bioclimático, acústico, hidrosanitario, eléctrico, iluminación natural y artificial, entre otros) según la naturaleza y el alcance de cada proyecto, encargados de su desarrollo en etapas intermedias e incluso finales del proceso de diseño, cuya solución es tratada como un conjunto de procedimientos genéricos adaptados a las necesidades de cada caso, y donde el diseñador solo interviene como coordinador de los mismos.

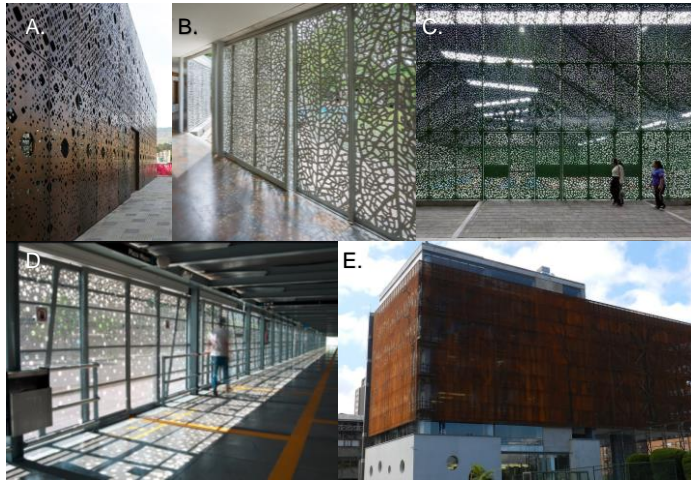
Adicionalmente, el uso o proposición de lenguajes arquitectónicos con geometrías complejas en Colombia, es escaso, esto a causa de una persistente práctica de metodologías y estilos modernistas de geometrías puras dentro de la arquitectura contemporánea, en donde factores como la facilidad constructiva, la economía de producción, el bajo mantenimiento y el desconocimiento de nuevas herramientas digitales que pueden facilitar la producción de características más complejas, juegan un papel importante para el establecimiento del statu quo en la arquitectura y construcción nacionales.

En efecto, el número de oficinas o estudios cuyas metodologías, aproximaciones o procesos de diseño emplean de forma cotidiana, software y técnicas de diseño

computacional y fabricación digital (bien sea para la producción de geometrías convencionales o complejas), es prácticamente inexistente. Sin embargo, algunas oficinas que han explorado algunos procesos puntuales de fabricación digital en sus obras, incluyen a “Javier Vera arquitectos”, “El equipo de Mazzanti”, “Plan:B” y “Ctrl G arquitectos”. Se identifica eso sí, que ese proceso con esta tecnología se mantiene invariable a través de los proyectos de estos arquitectos, es decir, como elemento de revestimiento y/o de control solar, explorando siempre variados patrones gráficos personalizados, con resultados orientados principalmente al aspecto estético de las edificaciones, como se observa en la figura 3-4.

**Figura 3-4:** Proyectos con aplicaciones de fachada mediante fabricación digital.

A. Museo de Arte Moderno, Medellín. B. Casa en Santa Fe, Santa Fe de Antioquia. C. Cuatro Escenarios deportivos, Medellín. D. Estaciones Metroplus, Medellín. E. Edificio “Fundadores” Universidad El Bosque, Bogotá.



Fuentes: A. <http://www.caparquitectura.com/mamm/> - B. <http://www.planbarq.com/#/casa-en-santa-fe/> - C. <https://www.flickr.com/photos/jvarquitectos/> D. <http://www.planbarq.com/#/4-escenarios-deportivos/> E. <http://www.industriasdca.com>

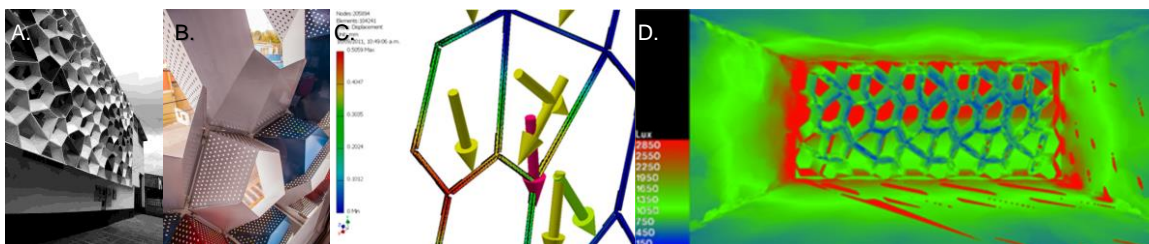
- Consultores y Fabricantes

Del mismo modo que con los diseñadores, dentro de la oferta del mercado nacional aún es difícil hallar consultores especializados en el tema de fabricación digital. En adición al desconocimiento en el tema por parte de la gran mayoría de los arquitectos diseñadores y constructores, se observa que existe una percepción generalizada, sobre los aspectos de manufactura de elementos o piezas especiales. Se asume que cuando son necesarios, son potestad y responsabilidad del proveedor y/o fabricante, a partir de unos lineamientos básicos determinados por el diseñador.



Las pocas empresas dentro de la industria local, que involucran directamente la fabricación digital y excepcionalmente el uso de herramientas de diseño computacional no sólo en el diseño sino también en su desarrollo, como valores agregados dentro su oferta de servicios o productos, se concentran en lo que se podría considerar el equivalente a la ingeniería de fachada, especialidad fuertemente consolidada en otros contextos. Al respecto, en el entorno local sobresalen algunas empresas tales como “Frontis 3D” (uno de cuyos proyectos se observa en la figura 3-5), “Rolformados S.A.”, “Geometrix” y “Disfachadas”, empresas apoyadas por otras del sector de la metalmecánica o que directamente hacen parte del mismo sector, puesto que ha sido en este mismo, donde en primera instancia se ha hecho uso de la maquinaria cnc en el país.

**Figura 3-5:** Fachada mediante diseño computacional y fabricación digital por una consultora.  
 A. Sistema de control lumínico en fachada, oficinas SEM Ingeniería por Frontis 3d. B. Detalle de los módulos C. Simulación por FEA de la estructura de soporte. E. Simulación de iluminancia.



Fuente: <http://www.frontis3d.co/trabajo/sem/>

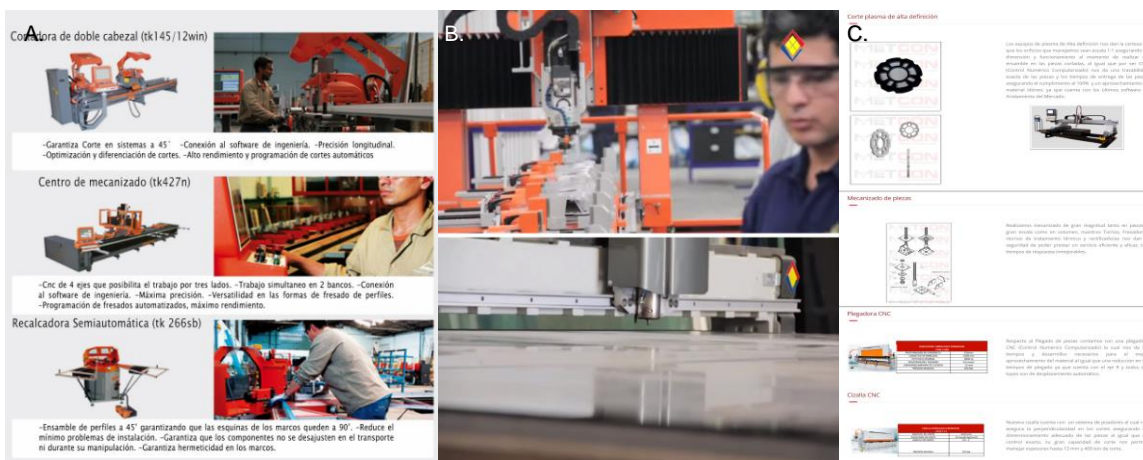
No obstante, se reconocen otros usos de esta maquinaria en la construcción dentro de la industria manufacturera local, prácticamente de forma convencional. Ese es el caso de la producción de piezas especiales a medida que hacen parte de sistemas para estructura metálica (uniones, anclajes o soportes), en donde medios de alta precisión deben ser empleados, con el objetivo de garantizar la eficiencia y calidad del sistema, con base en cálculos ejecutados.

De modo similar ocurre con fabricantes de sistemas de ventanería de tipo muro cortina (también conocidas como fachadas flotantes), que si bien en muchos casos son sistemas fabricados en otros países e importados (sobre todo en proyectos con grandes presupuestos), algunas compañías locales emplean maquinaria cnc, como se observa en la figura 3-6. Esto facilita, por ejemplo, la producción y procesamiento de perfilería metálica y corte del vidrio, pero no se explota al máximo el potencial de su flexibilidad,

puesto que esto conlleva dificultades dentro de líneas de ensamble y de producto, con restricciones estrictas ya establecidas, que de incumplirse acarrearían incrementos en los costos. A esto se suma también, como ya se ha visto, una baja demanda de proyectos personalizados.

**Figura 3-6:** Maquinaria cnc en procesos de línea de producción establecidos.

A. La empresa AGS, posee equipo de corte en 4 ejes, centros de mecanizado y recaladora para asegurar la perpendicularidad en ensambles de perfiles. B. La empresa Ventanar posee equipos de corte y mecanizado cnc. C. Empresa Metcon, cuenta con equipos de corte plasma, mecanizado de piezas, plegado y cizalla cnc.



Fuentes: A. [https://prezi.com/2oj\\_fdjeieof/presentacion-ags-sas](https://prezi.com/2oj_fdjeieof/presentacion-ags-sas) - B. <http://www.ventanar.com/> - C. <http://metconcolombia.com/manufactura/>

Como se ha podido observar, se recoge de las tres categorías de análisis, que **el grado de implementación de las tecnologías digitales de diseño y manufactura en el contexto colombiano es todavía incipiente**, si se considera que las mismas no son completamente ajenas a la construcción a nivel global y su uso se viene dando aproximadamente desde hace dos décadas. Asimismo, y como ya se mencionó, el alto grado de desconocimiento entre arquitectos **incluso desde los entornos académicos**, es otro factor que contribuye a dicho estado.

En adición a lo anterior, de acuerdo con Maing y Vargas (2013), a pesar de que, en el medio colombiano, una ventaja de la fabricación digital tal como la reducción de tiempos de producción e instalación es atractiva para su expansión (dicho específicamente para el caso de los fabricantes de fachadas), **los altos costos de la maquinaria cnc deben**

---

**competir con los bajos costos de la alta oferta de mano de obra disponible.** Igualmente, estos autores señalan que, **existe una creciente necesidad de optimización de líneas de producción que permita competir con productos importados** (especialmente de Asia), resultado de políticas globales del mercado.

Por lo tanto, los aspectos arrojados por este análisis, justifican la búsqueda de posibles causas adicionales, que impiden una adopción, pero especialmente una apropiación tecnológica más rápida, al considerar las ventajas ya comprobadas en otros contextos, sobre el uso de la tecnología digital en la industria de la construcción y la creciente democratización del acceso a la misma.

### 3.3 Diseño metodológico

A partir de la información expuesta hasta ahora a modo de marco teórico, la naturaleza del problema de estudio y la pregunta de investigación planteada, este trabajo es abordado bajo el enfoque cualitativo. Esto quiere decir que, el objeto de conocimiento requiere una aproximación sistémica que permita **conocer el punto de vista de los actores del objeto de estudio dentro del contexto establecido.** Para tal fin, se empleará como herramienta de recolección de información, la entrevista semi-estructurada. Este tipo de entrevista consiste en un conjunto de preguntas y temas a explorar, establecidos en un esquema flexible y no estandarizado de interrogación, es decir, sin una redacción exacta ni tampoco un orden de exposición. Se caracteriza, además, por ser propiciada y conducida por el investigador y dirigida a sujetos específicamente seleccionados.

Para este diseño metodológico, las categorías de análisis, nuevamente requieren una variación, en tanto la muestra seleccionada no coincide exactamente con las categorías precisas fijadas en el marco teórico para el análisis del problema, en este caso serán: instituciones educativas; diseñadores - consultores, y fabricantes. Las entrevistas a llevar a cabo en esta investigación, fueron concebidas teniendo presente que la óptica propia de cada participante puede comportar variaciones, en función de la categoría dentro de la que cada uno es clasificado para efectos de este trabajo. En otras palabras, su aportación variará de acuerdo a su rol dentro del fenómeno de estudio en el contexto. Teniendo claro que la entrevista semi-estructurada admite un esquema flexible de

preguntas, un conjunto de aspectos será indagado en común en los tres grupos, sin embargo, habrá diferencias en el planteamiento de algunas de las preguntas, con el objeto de enfatizar el rol de cada sujeto en su categoría.

Para la primera categoría, instituciones académicas, las preguntas son:

- ¿Qué condiciones o circunstancias –sociales, políticas, económicas, culturales, etc.- considera que son factores que impiden una adopción y/o apropiación más rápida de estas tecnologías tanto en el ámbito académico nacional como en la práctica del diseño arquitectónico y la industria de la construcción?
- ¿Qué factores considera que podrían acelerar estos procesos?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales aprendizajes en el contexto de enseñanza e investigación sobre medios digitales para el diseño y la construcción?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales retos en la enseñanza e investigación?
- ¿Qué factores de oportunidad ve que puede tener la academia (a través de Investigación y Desarrollo) en la industria de la construcción para el contexto local? ¿Qué se requiere para que la academia jalone a la industria de la construcción en Colombia, como sucede en otros contextos?
- ¿Cómo ve este fenómeno tecnológico en el contexto local a mediano plazo (10-15 años) desde la academia hacia la industria de la construcción?

En la segunda categoría, de diseñadores - consultores, las preguntas son:

- ¿Qué condiciones o circunstancias –sociales, políticas, económicas, culturales, etc.- considera que son factores que impiden una adopción y/o apropiación más rápida de estas tecnologías tanto en la práctica del diseño arquitectónico y en la industria de la construcción?
- ¿Qué factores podrían acelerar estos procesos?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales aprendizajes respecto al uso de estas tecnologías en el contexto local?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales retos respecto al uso de estas tecnologías en el contexto local?

- 
- ¿Qué factores de oportunidad ve respecto al uso de estas tecnologías en el contexto local?
  - ¿Cómo ve este fenómeno tecnológico en el contexto local a mediano plazo (10-15 años)?

Por último, en la categoría de fabricantes, se pregunta de forma más específica, así:

- ¿Cómo es el proceso de desarrollo de producto y de flujo de trabajo con el cliente, en los proyectos con alto nivel de personalización de acuerdo a requerimientos del proyecto? Cómo se conecta esto con otras variables funcionales diferentes de lo constructivo o lo estético (análisis y/o simulación estructural, bioclimática, acústica, etc.)?
- ¿Cuáles son los valores agregados en sus productos y proyectos?
- ¿Qué factores encarecen en mayor medida sus procesos de producción?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales aprendizajes dentro el mercado local?
- ¿Cuáles considera que han sido sus principales retos dentro del mercado local?
- ¿Qué factores de oportunidad ven para la fabricación digital en el mercado local?
- ¿Cómo se aborda el tema de innovación tecnológica en sus procesos tanto productivos como de diseño?
- ¿Qué factores considera usted, que impiden un mayor aprovechamiento de la flexibilidad de la tecnología cnc en el diseño y la construcción en Colombia?
- ¿Cómo visualiza la inclusión de nuevas tecnologías de manufactura (impresión 3d, robótica y fabricación digital en la obra) y conceptos de producción industrial (Internet de las Cosas, Smart Factory o Industria 4.0) y su relación con la mano de obra en la construcción en Colombia a mediano plazo (10-15 años)?

Estos cuestionarios fueron diseñados bajo una estructura compartida, que mantiene presente la indagación respecto a los factores que se quieren conocer sobre adopción y apropiación tecnológica, pero también sobre aprendizajes y retos que cada entrevistado ha tenido a lo largo de su experiencia en el tema, puesto que allí podrían surgir nuevas pistas para la comprensión del problema. Al analizar la información recogida en forma de testimonios, se espera obtener un panorama más claro y amplio, más no una generalización, del rol de los medios digitales en diseño y construcción, así como de las causas que impiden su adopción y apropiación de forma más rápida en el contexto

estudiado. Igualmente, se quiere conocer las perspectivas sobre el tema que tienen los entrevistados, teniendo presente que la reflexión es parte de los objetivos de este trabajo, y como tal “*es el puente que vincula al investigador y a los participantes*” (Mertens, 2005).

### **3.3.1 Descripción de la muestra**

Partiendo del enfoque metodológico ya mencionado, la aplicación de la entrevista semi-estructurada “exige una muestra que no podrá estar constituida por elementos aleatorios descontextualizados (...), sino por ‘un todo’ sistémico con vida propia”. De este modo, “se impone la profundidad sobre la extensión y la muestra se reduce en su amplitud numérica, y se explicitan los criterios conceptuales para su escogencia, según su relevancia para los objetivos de la investigación” (Martínez, 2006).

De acuerdo con las categorías establecidas para la aplicación de las entrevistas, se procede a seleccionar algunos individuos considerables como representativos en cada una, tomando en consideración que su experiencia y producción son de alta relevancia para los objetivos de esta investigación, bien sean de orden académico (de docencia y/o investigación), profesional (aplicada) o mixta. Las siguientes descripciones proveen una idea más precisa al respecto.

- Instituciones académicas

En la categoría de instituciones educativas se entrevistó (por separado) a los arquitectos y docentes Diego Velandia y Roland Hudson, de la facultad de arquitectura de la Universidad de Los Andes en Bogotá, quienes han impartido las asignaturas de “arquitectura digital” y “visualización y simulación” y cursos de extensión sobre “modelado de datos para arquitectos”. Además, lideran investigaciones en modelos participativos de diseño en la construcción de la vivienda rural desde la fabricación digital; el modelado paramétrico como opción adaptable de BIM para países en desarrollo; e innovación de procesos pedagógicos de enseñanza aprendizaje del componente tecnológico en proyectos arquitectónicos, entre otras.

- Diseñadores y Consultores

En la categoría de diseñadores y consultores se entrevistará al arquitecto Rodrigo Velasco, quien es gerente general de la empresa “Frontis 3d” en Bogotá, la cual se especializa en consultoría para el diseño y desarrollo de sistemas de fachada en proyectos arquitectónicos, integrando soluciones a la medida de las necesidades, en donde se combinan la optimización de aspectos de la edificación tales como el desempeño energético y lumínico combinados con un alto valor estético, a través de herramientas y procesos digitales de simulación y fabricación. En adición a lo anterior, su experiencia como investigador incluye cuatro años en la universidad de Nottingham, Reino Unido, en el proyecto “FRP in the Construction of Building Envelopes”, tres años en la Universidad Nacional de Colombia, en el área de nuevos materiales del Grupo de Morfología Estructural de la Facultad de Artes, y un año en la Universidad de Hong-Kong en el área de prototipado rápido en los programas de Arquitectura e Ingeniería Mecánica. Actualmente es profesor e investigador de la Universidad Piloto de Colombia, en la línea de tecnología expresiva.

- Fabricantes

En esta categoría se entrevistará al ingeniero John Zuleta, director comercial de la empresa “Rolformados S.A.”, empresa antioqueña del sector metalmecánico con algo más de diez años de experiencia, y tal vez una de las más reconocidas a nivel nacional en el diseño y desarrollo de sistemas de revestimiento y control solar en fachada, mediante materiales metálicos y procesos de fabricación digital con un alto nivel de personalización de los proyectos.

### **3.4 Resultados**

A continuación, se presentarán los resultados de la aplicación del conjunto de entrevistas semi-estructuradas, clasificadas en las categorías de análisis establecidas para esta parte del análisis. Estos testimonios se muestran aquí de manera sintetizada y concreta, estableciendo así los aspectos más importantes, con miras a responder la pregunta de la investigación. Las entrevistas en su versión completa podrán ser consultadas en el Anexo A, de este documento.

### 3.4.1 Resultados categoría Instituciones académicas

Participante: D. Velandia, comunicación personal, 04 de mayo de 2016.

En la opinión del profesor Diego Velandia, los factores más importantes que retrasan los procesos de adopción y apropiación de la tecnología digital en la academia, el diseño y la construcción hay cuatro variables a saber: la variable económica, relacionada con los altos costos de equipos, su respaldo y mantenimiento limitados, el bajo nivel de capacitación existente, así como también el lento retorno de la inversión, especialmente en centros educativos y de investigación. La variable cultural, que implica una resistencia natural al cambio y la lentitud en la transformación de la industria de la construcción, en donde los sistemas constructivos actuales datan de la posguerra y cuya única intención es producir en masa un mismo producto, sin ir más allá de eso.

La rentabilidad y la eficiencia de procesos solo son estudiadas para mejorar la relación costo/beneficio, con lo cual se dificulta la entrada de nuevas tecnologías que produzcan nuevos escenarios que conduzcan a la producción de soluciones que respondan mejor a las necesidades. La variable educativa, señala que en la actualidad la educación arquitectónica responde a realidades de décadas pasadas y no a los retos y tecnologías de hoy, por lo tanto, empresas e industria de la construcción no van a asimilar de forma adecuada dichas tecnologías, representadas, por ejemplo, en software y nuevas metodologías de trabajo. La falta de estructura en la relación academia-industria acerca del tema de las tecnologías digitales. En Colombia hasta ahora hay muy pocas personas realizando proyectos de investigación en el tema, de forma separada, no estructurada - fenómeno al que llama "impulsos"-, estudiando temas como la optimización de procesos como el corte láser, que, si bien representan beneficios económicos inmediatos, ya se empiezan a masificar.

En cuanto a los factores que ayuden a acelerar los procesos de adopción y apropiación tecnológica, el entrevistado indica que, en la medida que se gestionen proyectos de investigación bien estructurados y direccionados en donde estas tecnologías tengan mucha presencia y relevancia, eso obliga a que las personas involucradas tengan que capacitarse en el extranjero, traer expertos, promover vínculos con empresas u otras entidades como por ejemplo el SENA u otras entidades de formación técnica y tecnológica, donde los resultados de esas investigaciones puedan llegar a más gente.



Los temas a investigar, deben ser de alto impacto para el contexto, y no de la tecnología por la tecnología (como ya sucede en otros lugares), ya que esto no tiene relevancia para las necesidades locales. Investigar la capacidad de estos medios, por ejemplo, para temas como la producción en serie de vivienda, vivienda rural, mejoramiento de vivienda o autoproducción de componentes para construcción con costos reducidos en contextos de bajos ingresos, facilitando la generación de materiales propios, empezaría a generar una cadena de valor, pudiendo llegar a otros escenarios y capacitando a otro tipo de personal (es decir, no necesariamente arquitectos o constructores).

Para Velandia, los aprendizajes y retos en el tema se han presentado de la siguiente manera: la docencia fue su punto de partida en el tema, en donde pudo confirmar que, con la complejidad que tiene un proyecto de arquitectura, estas tecnologías brindan múltiples opciones para llegar a un mismo resultado, pasando por diferentes procesos. Desde la docencia ha podido acercarse a múltiples fuentes de información, que le han permitido obtener una visión global sobre lo que está ocurriendo en el tema y empezar a experimentar posibles modos de apropiación. También, el ejercicio de la docencia le ha conducido a proyectos de investigación aplicada o de consultoría en diseño, donde principalmente los medios digitales han servido en la administración de procesos complejos de diseño, que integran múltiples variables, con la posibilidad de generar múltiples posibilidades y la escogencia de los resultados más adecuados, proceso que sin las tecnologías digitales no se realizaría. En un escenario como el del BIM, ya se puede observar algo así, sin embargo, muchas veces resulta tan complejo para el contexto local, que no funciona bien, mientras que la posibilidad de programar y hacer soluciones propias funciona mucho mejor.

Uno de sus principales retos ha consistido en transmitir a los estudiantes, que existe la posibilidad de que los procesos de diseño no son solamente lineales, sino también en ciclos donde se pueden estudiar muchas iteraciones, aumentando la complejidad en la medida en que se entienda el proceso. El producto de estos ejercicios se ha llevado hasta la elaboración de prototipos en la medida de las posibilidades.

Por último, su opinión sobre los requerimientos para promover la relación academia-industria, donde la primera sea la guía de la segunda, el entrevistado indica que surgen diversas inquietudes que nadie se está preguntando, por ejemplo, cómo las posibilidades

tecnológicas existentes en la actualidad en otros lugares, pueden funcionar en Colombia, ¿cómo deberían aplicarse o crearse?, ¿cómo aprovechar los recursos locales para ello? Anteriormente existieron organizaciones como el CINVA en la Universidad Nacional y otras instituciones similares también en universidades, pero no hicieron parte de iniciativas estructuradas. El alto costo de las infraestructuras para investigar, como por ejemplo laboratorios y equipos, tiene fuentes de recursos económicos que normalmente provienen del estado, lo cual es una de las barreras más importantes para su desarrollo.

Otro aspecto que indica, es que la industria de la construcción no invierte recursos en investigación ya que cuenta con un producto relativamente rentable, consolidando una "zona de confort" propia. El estudio de temas relevantes y de impacto para el contexto local, puede fortalecer la investigación, temas que además permitan generar redes que permiten extender el alcance, como el empoderamiento de comunidades locales y sus recursos. Fenómenos de este tipo ya se están dando en algunos lugares como, por ejemplo, en algunos países del norte de África donde el reciclaje de residuos sólidos, permite la obtención de materias primas (plásticos) para su uso como materias primas en tecnologías apropiadas de impresión 3d.

Participante: R. Hudson, comunicación personal, 04 de mayo de 2016.

Para el profesor Roland Hudson, si bien la maquinaria de fabricación digital permite crear complejidades formales inusitadas, en su opinión, primero hace falta comprender mejor, mediante argumentos más sólidos, su uso en general y en la construcción. Con base en su experiencia profesional, en países como Inglaterra o Canadá, el impacto del uso de estas tecnologías aún es difícil de observar a la escala de las edificaciones, el caso contrario se observa a la escala de, por ejemplo, el mobiliario u otros productos de consumo masivo. El impacto de la economía de escala es naturalmente mucho más notorio en la fabricación naval o automotriz, resulta interesante entonces, comparar la complejidad en el incremento de costos de producción a través de diversas escalas como, por ejemplo, entre objetos como un carro o un teléfono celular respecto a un edificio. Allí se puede observar cómo se produce dicho incremento, en la medida en que la escala y el peso se reducen, pero sus componentes se complejizan en el espacio.

La tecnología actual de fabricación digital es relativamente sencilla de entender, por lo tanto, indica Hudson, los arquitectos deberían involucrarse más allá del diseño de la edificación, e ir al diseño de los procesos de producción. Ello podría significar un factor de oportunidad para acelerar la apropiación tecnológica. Algunos dispositivos electrónicos de bajo costo, permiten entender las tecnologías y prototipar soluciones. En Colombia existe la capacidad para interactuar y crear a partir de esos desarrollos. Por lo tanto, cabe preguntarse, ¿por qué no se está dando ya el desarrollo de tecnologías propias a partir de instrumentos digitales abiertos y flexibles?, ¿por qué se mantiene únicamente la posición de consumidores de tecnología?

En cuanto a aprendizajes y retos en su experiencia como educador e investigador en estos temas, ha observado un reto importante en la educación de la arquitectura. Hudson señala que hace falta la producción de una base de conocimiento, que permita fundamentar la enseñanza de los medios digitales. Específicamente sobresalen aspectos que deben ser enseñados con mayor detalle, referentes a los tipos de archivos, las estructuras de datos y los métodos para el manejo computacional de la geometría. En su opinión, "una enfermedad en la arquitectura, es el uso de la palabra 'digital'", puesto que es muy ambigua. Los estudiantes (de diseño, arquitectura e ingeniería) deberían poder comprender a fondo los principios subyacentes de los programas que se emplean en la actualidad, esto les permitirá crear desarrollos cada vez mejores.

Por otra parte, cuando se le pregunta acerca de qué condiciones o características considera que se requieren para que todos los actores de la industria de la construcción y la academia puedan producir avances mediante la investigación y desarrollo, el entrevistado considera que los actores relacionados en la construcción (diseñadores, ingenieros, constructores, contratistas, proveedores, etc.) pueden interrelacionar diversas fuentes de información, organizadas en bases de datos, que faciliten flujos de información y de trabajo, de manera coordinada y con una mirada propia hacia la resolución de las dificultades en la industria local. Es aquí, donde metodologías de trabajo como la del BIM y la de *Entrega Integrada de Proyecto (Integrated Project Delivery* o *IPD* por sus siglas en inglés), pueden contribuir a la conformación de tales bases de conocimiento, que conecten los saberes locales en la construcción.

Finalmente, su opinión acerca de las perspectivas sobre la tecnología digital para el diseño y la construcción en el contexto local a mediano plazo, plantea que, sí es factible un escenario en donde la industria de la construcción en países en desarrollo como Colombia pueda alcanzar el nivel de tecnológico de esa misma industria en países desarrollados, considerando la velocidad con que crece y se difunde la tecnología en el presente. No obstante, para dicho escenario, se requiere un cambio de mentalidad. En otras palabras, se debe dejar de simplemente esperar lo que el mercado tiene para ofrecer y, por el contrario, adoptar una posición creativa en el desarrollo de tecnologías propias o mejorar las existentes, sin perder la oportunidad de observar lo que ha sucedido con los desarrollos tecnológicos de otros contextos para aprender de sus errores.

### **3.4.2 Resultados categoría diseñadores y consultores**

Participante: R. Velasco, comunicación personal, 15 de abril de 2016.

El arquitecto Velasco considera que existen tres factores principales que dificultan el avance de las tecnologías digitales de fabricación en Colombia, pero que a su vez son estos tres factores, los que, de solucionarse, eventualmente impulsarían ese mismo avance tecnológico, estos son: en primer lugar, la economía como motor de la actividad comercial, en donde si bien se puede decir que Colombia está en una posición privilegiada respecto a su región, todavía no alcanza un estado suficiente que permita mayores niveles de inversión en los presupuestos de los proyectos de construcción, que posibiliten la implementación de soluciones constructivas especiales. En segundo lugar, aunque la industria metalmecánica nacional es importante y presenta un buen punto de partida para poder producir para la construcción, todavía hay una muy baja disponibilidad de infraestructura (maquinaria). Por último, existe un alto nivel de desconocimiento de estas tecnologías entre diseñadores y fabricantes.

En el tema de aprendizajes a partir de su experiencia profesional, afirma que encontrar una falta de mercado para proyectos especiales ha sido un gran obstáculo, que se derivó a su vez de aprender que el grado de flexibilidad de las herramientas digitales, no es tan amplio como se pensaba, puesto que, por ejemplo, diseñar, desarrollar, instalar y gestionar un producto enteramente a la medida, produce un incremento de los costos,

demasiado alto. Asimismo, contar con personal con mayor conocimiento en todas las etapas de la producción es igualmente costoso.

Para él, aparecen como retos, la búsqueda de vías para ofrecer esta clase de servicios en un mercado con muy poca demanda, a causa de -como ya se mencionó- un desconocimiento por parte de los diseñadores que les permita entender las posibilidades de la tecnología digital. Adicionalmente, surgen también asuntos sobre la optimización de procesos y procedimientos internos en el manejo de datos, que se marginan por factores de tiempo o necesidad.

Como una observación desde el entorno académico, el desarrollo de las herramientas BIM, sobre todo para grandes empresas de la construcción, es la dirección que señala Velasco como factor de oportunidad en la actualidad y a futuro, en el desarrollo de la tecnología digital para la construcción en el contexto nacional. Principalmente con el fin de explorar las posibilidades no necesariamente para la fabricación, sino más bien en aspectos más “sensibles” del desarrollo y control del proyecto arquitectónico y constructivo, a través de la gestión de datos, en donde la búsqueda principal se dará siempre en torno a beneficios como la reducción de costos, como ya se está empezando a ver en países de la región como Perú y Chile, y en menor medida Brasil.

Para concluir, en el tema de vinculación academia-industria, Velasco opina que el nivel educativo tiene un avance tardío en Colombia, debido a la lentitud con que algunas instituciones pueden cambiar y actualizarse a nuevas demandas del mercado, que en la medida en que este último lo exija hará que proceso se dé más rápido. Sin embargo, este proceso seguirá avanzando lentamente, mientras se conserve la posición de seguimiento a la industria por parte de la academia, y no tome el papel de liderazgo que debería tener, como ocurre en otros contextos.

### **3.4.3 Resultados categoría fabricantes**

Participante: J. Zuleta, comunicación personal, 10 de mayo de 2016.

En primera instancia se preguntó acerca de cómo suceden los procesos de desarrollo de producto y de flujo de trabajo con el cliente, en proyectos con alto nivel de

personalización, así como también si se produce alguna conexión con variables funcionales diferentes de lo constructivo o lo estético (por ejemplo: análisis y/o simulación estructural, bioclimática, acústica, etc.) El participante indicó que los desarrollos nacen de necesidades concretas de cada cliente según su requerimiento, así como de la búsqueda de materiales que permitan un óptimo funcionamiento del proyecto en estudio, esto acompañado de la correcta ingeniería y las normas que se deben cumplir, conservando lo estético y de paso las necesidades de durabilidad y bajo nivel de mantenimiento.

También se quiso conocer en su opinión acerca de qué características considera como valores agregados en sus productos y proyectos. Zuleta comenta que el nivel de desarrollo en ingeniería, las múltiples opciones de productos ofrecidos y el alcance total desde el diseño hasta la aplicación con el cliente final, son sus valores agregados. Igualmente, se indagó sobre los factores encarecen en mayor medida sus procesos de producción, en donde explica que todos los proyectos a la medida, requieren de un experto para personalizar los requerimientos, proceso que no admite errores, puesto que cualquier equivocación puede llegar a triplicar los costos de producción.

Respecto a los principales aprendizajes ganados a lo largo de la experiencia de la compañía dentro el mercado local, Zuleta señala que Colombia les ha permitido presenciar un momento de la historia donde se han producido grandes cambios urbanos, que han requerido nuevas propuestas desde la industria con un enfoque diferenciador, lo que los ha llevado a estar a la altura de compañías multinacionales. Sin embargo, en el aspecto de los retos encarados durante los años de recorrido en el mercado, el participante señala, que la ingeniería y desarrollo de modelos de sistemas espaciales ha sido uno de ellos (se debe tener en cuenta que la compañía trabaja sistemas de componentes planos para fachada).

Por otra parte, se quiso conocer en opinión del participante, qué factores de oportunidad ve la compañía para la fabricación digital en el mercado local, a lo que respondió, que se debe entender mejor qué es la fabricación digital, ¿se trata solo de dibujar y producir? O más bien de diseñar a la medida resolviendo todos los aspectos técnicos, de diseño, de ingeniería, de acabados, de durabilidad, de mantenimiento, etc. Si la definición es esta última, la oportunidad es absoluta, pues será la única manera de resolver los requerimientos generales de cualquier tipo de proyecto, en donde sostiene, que así lo

han venido realizando en la actualidad y ha funcionado. En el aspecto de implementación de la innovación tecnológica en los procesos tanto de producción como de diseño, el entrevistado comentó que ese es uno de sus procesos naturales, desde la idea con la que llega el cliente, hasta el montaje final.

Asimismo, se le pidió que, desde su perspectiva como parte de la industria, indicara los factores que impiden un mayor aprovechamiento de la flexibilidad de la tecnología de fabricación digital en el diseño y la construcción en el medio colombiano. Cuya respuesta fue resumida en la falta de conocimiento y de capacitación sobre las mismas. En cuanto a su visión sobre la eventual entrada de nuevas tecnologías en la industria manufacturera, por ejemplo, de la fabricación aditiva o robótica en sitio y su relación con la mano de obra en la construcción en Colombia a mediano plazo, el entrevistado afirmó que la fabricación aditiva, representada para él en la impresión 3d, es un paso que puede tardar por lo menos cinco años más para implementarse, debido a que aún se debe evolucionar en materiales que permitan diversas aplicaciones como las que ellos (Rolformados) producen. Si bien es cierto que ya existe maquinaria para este proceso con materiales como plásticos y madera, para metal hasta ahora se están haciendo estudios al respecto. El participante no ofreció una respuesta respecto a los demás escenarios planteados.

### **3.5 Conclusiones preliminares**

A partir de la información recolectada en forma de testimonios obtenidos a través de la realización de entrevistas a diferentes actores del contexto local, que están relacionados de forma directa con el fenómeno que investiga este trabajo, se obtienen opiniones desde diferentes puntos de vista, clasificados en los tres escenarios ya presentados.

Estas opiniones confirman en buena medida que, para el contexto colombiano, los factores que detienen el avance de la implementación de las tecnologías digitales, tanto en diseño como en construcción, no difieren de los cuatro factores mencionados al respecto por Herrera y Juárez (ver ítem 2.1), pero en este caso, con mayor énfasis en lo educativo, lo económico y lo administrativo, más que en relación al factor de gestión y mantenimiento.

Así mismo, ciertas particularidades que refuerzan estos factores pudieron ser observadas a través de los resultados obtenidos. Por una parte, en el entorno educativo, como manifestación de la lenta capacidad de adaptación de los modelos pedagógicos en instituciones académicas a los cambios tecnológicos, sumados a su vez a los altos costos de adquisición de la maquinaria, hacen pensar en la adquisición de la misma como una inversión que difícilmente se recuperará. Otra particularidad es, la falta de programas de investigación y desarrollo con impacto y relevancia para el medio local, de manera estructurada y conjunta con empresas del sector de la construcción, seguirá manteniendo el bajo nivel para asimilar y aplicar las nuevas tecnologías, pero sobretodo seguirá frenando la posibilidad de empezar a apropiarse de estas, mediante la generación de desarrollos específicos con aplicabilidad a problemas locales. Esto permite observar, el bajo interés por parte de la misma industria de la construcción en su propio avance tecnológico, lo que tal vez constituye uno de los principales obstáculos. Asimismo, dentro de la esfera académica, pero esta vez con afectación en el ámbito de la industria manufacturera, se identifica la falta de mayor y mejor oferta de capacitación técnica y tecnológica que permita un mejor aprovechamiento del recurso humano, en el uso de las tecnologías digitales, específicamente en manejo de la maquinaria cnc.

Con base en lo anterior, uno de los retos más grandes que surge en el contexto estudiado, es el de la educación en el tema. Habría que empezar por comprender mejor desde la teoría y la historia, para qué y por qué se ha producido, cómo ha evolucionado y cómo se emplea la tecnología digital en el diseño y la construcción, así como también entender la lógica subyacente en cada parte y aspecto de sus componentes (software y maquinaria), más allá de su simple manejo. Posteriormente, se debería buscar su aplicabilidad en problemas locales y, por último, promover y desarrollar los mecanismos necesarios para generar familiarización y luego apropiación, (por ejemplo, un punto de partida de gran utilidad para tal fin, sería realizar talleres en fablabs de universidades y externos, sobre programación de software y de microcontroladores de código abierto, para producir prototipos de máquinas cnc de diversos usos). En todo esto, la industria de la construcción podría jugar un papel muy importante en alianza con las instituciones educativas, al señalar los derroteros en la búsqueda de soluciones para superar los problemas cotidianos que más se presentan en su ejercicio, pero sobretodo con miras a la generación de innovación.



Por la misma vía, la difusión del tema es un aspecto que resulta clave en la actualidad, si lo que se pretende lograr es, la expansión de un muy pequeño mercado para la producción de soluciones especializadas en arquitectura, con un mayor aprovechamiento de los recursos y la oferta que ya se ha venido creando. El alto nivel de desconocimiento en el tema por parte de arquitectos diseñadores y la percepción errónea, de que necesariamente el uso de la fabricación digital tiene impactos negativos en los costos de un proyecto, en cualquiera de sus posibles aplicaciones, está llevando al desaprovechamiento de la infraestructura existente para tal fin que, aunque todavía es pequeña, tiene sus oportunidades de crecimiento sembradas en la industria de construcción.

Por lo tanto, despertar el interés en el tema por parte de los constructores, mediante la exposición de las posibles ventajas para el ejercicio de la construcción, es tal vez el máximo reto. En donde, como ya lo señalaron Maing y Vargas (ver ítem 3.2) este modelo de producción debe competir con el modelo local basado extensamente en una amplia oferta de mano de obra que, no obstante, no logra ofrecer las mismas ventajas.

De acuerdo con los expertos consultados, un camino de oportunidad para las tecnologías digitales en la construcción, que no está necesariamente ligado a la manufactura digital, pero que ya viene dándose desde la academia y es a su vez un escenario de gran potencial a mediano plazo, tiene que ver con una implementación de formas de trabajo basadas en la metodología BIM. Al tener un mayor control de los procesos y lograr avances en la reducción de costos, es desde ya suficientemente atractivo para las constructoras. No obstante, Velandia sostiene que, para un medio como el colombiano, resulta más eficiente el uso del modelado paramétrico, adaptado como sistema BIM, efecto que ya ha sido demostrado a través de un proceso de integración de variables y toma de decisiones para la estructuración de proyectos de construcción de vivienda, así como también, como mecanismo de diseño participativo en procesos de diseño y construcción de vivienda rural (Velandia 2015; 2013).

## **4. Reflexión: Escenarios potenciales en el contexto local**

Al reunir todos los temas hasta ahora estudiados, se cuentan por una parte, el contexto histórico del diseño computacional, los diversos enfoques metodológicos -previos y posteriores a la aparición del computador- las diversas modalidades de fabricación digital existentes y los procesos de operación que empiezan a establecer nuevas maneras de proceder, con impactos, ventajas y recursos ya observados, así como el camino en normalización en cuanto a la democratización tecnológica de estos últimos a nivel mundial, que ya se empieza visibilizar cada vez más en diversas manifestaciones en América latina.

Por otra parte se suman a estos, el modelo de la prefabricación que nunca llegó a consolidarse en la construcción en Colombia, el evidentemente bajo nivel de penetración que hasta ahora han tenido las herramientas digitales en diseño y construcción y la convergencia de las opiniones consultadas a expertos involucrados directamente en la materia, llevan a pensar que la eventual transformación de la industria de la construcción, que paulatinamente va sucediendo en países industrializados, también afectará a la industria de la construcción en Colombia, y del mismo modo, tenderán a transformarse los roles del arquitecto diseñador, el constructor y de sus respectivos procesos en la producción edilicia, de acuerdo a su realidad local.

A la luz de todo lo anterior, pero también de otros avances de la actualidad relacionados al tema, la presente investigación plantea la visualización a modo meramente

especulativo y propositivo, de tres escenarios probables a mediano plazo (de diez a quince años) en torno al uso y desarrollo de la tecnología digital de diseño y construcción en Colombia. La importancia de considerar estos escenarios, radica en hacer una reflexión y un aporte que eventualmente pudiera señalar caminos de exploración hacia el futuro en el contexto local.

## **4.1 FabLabs como motores de emprendimiento para la construcción**

Desde la academia y con el apoyo de empresas de diseño y construcción, los fablabs, en su verdadero rol de espacios de experimentación y creación, y no como simples instalaciones auxiliares -papel que hasta ahora tiene la mayoría de ellos en el país- se visualizan como espacios de creación, incubación y empoderamiento de nuevos proyectos de emprendimiento empresarial. La producción interdisciplinaria entre arquitectura, diseño industrial, ingenierías y biología, puede ser un motor de innovación bastante efectivo para crear nuevas soluciones que ofrecer en el mercado y a la misma industria de la construcción, entre otras.

Ejemplos de este tipo de colaboraciones estructuradas de investigación y desarrollo, se pueden ver en casos como el de la red ETN InnoChain, que reúne entidades de varios países entre las que se hallan escuelas de arquitectura e institutos de investigación en universidades, así como también oficinas de diseño, ingeniería y consultoría especializada, constructoras, proveedores y fabricantes de materiales y fabricantes de software, bajo un compromiso con el desarrollo y avance de herramientas digitales que generen una cadena de valor en el diseño, a través de los procesos de innovación, comunicación potencial, y simulación y materialización. De acuerdo a como está expresado en su página web (<http://innochain.net>), “esta red apunta al entrenamiento de una nueva generación de investigadores interdisciplinarios con un fuerte enfoque industrial que puedan efectuar cambios reales en la forma en que pensamos, diseñamos y construimos nuestro ambiente físico”.

Otro caso similar se encuentra en Texas, Estados Unidos. La red Tex-Fab (ver <http://www.tex-fab.net>) agrupa a un creciente grupo de empresas emergentes, instituciones y personas, que se concentran en la exploración de la producción digital en

diseño y manufactura de componentes para la construcción. De esta forma, se aprovecha la oportunidad de intercambio colaborativo entre las comunidades académica, técnica y profesional, con el fin de influenciar los recursos existentes a lo largo de diversos centros urbanos en ese país.

## **4.2 Herramientas digitales aplicadas en las tradiciones constructivas locales**

Sistemas constructivos tradicionales de la vivienda rural colombiana tales como la guadua y otros inclusive ancestrales, como la tierra pisada, el bahareque o el adobe han empleado convencionalmente mano de obra y materiales del lugar. Sin embargo, el estudio de su tecnificación se ha dado más bien de forma aislada, concentrándose en la solución de patologías en construcciones existentes o de tipo patrimonial, en donde se siguen empleando medios manuales, que son los más ampliamente disponibles.

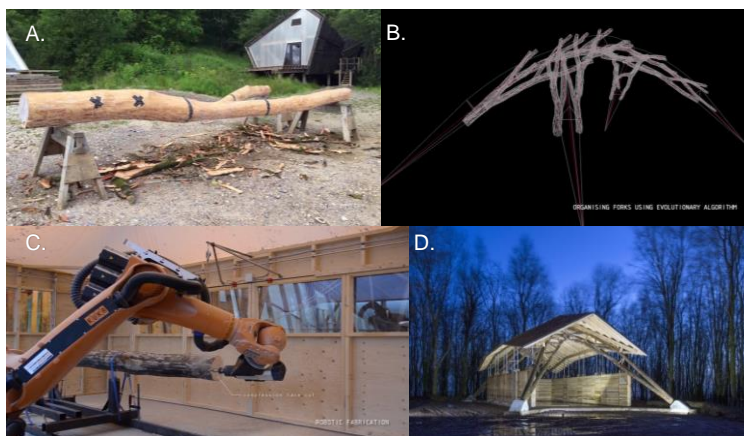
Sin el ánimo de desprender de su identidad y carácter artesanal a estos sistemas autóctonos, aquí yace una oportunidad para producir innovación a nivel de lo constructivo e incluso lo estético, a partir del uso de herramientas digitales, cuyo punto de partida puede darse con la caracterización de los materiales por medios computacionales para su optimización. También para una exploración de sus posibilidades formales, que pueda conducir a nuevas propuestas que, aunque podrían percibirse como inusitadas en el contexto de la ruralidad, en términos de desempeño podrían representar funcionalidad y durabilidad mejoradas.

Para los métodos a base de tierra, la fabricación digital con técnicas como el seccionado, pueden aportar aplicaciones tan relativamente básicas como, por ejemplo, la producción de cimbras de geometrías complejas y variables, no obstante aportes más complejos e interesantes, podrían darse con sistemas de manufactura aditiva. Como ya se ha observado, se ha empezado a experimentar con impresoras 3d de pequeño y gran formato para arcilla y tierra, e inclusive se han adaptado a brazos robóticos, pero su uso en el lugar de la obra aún no sido estudiado, y menos aún en las condiciones complejas como los entornos rurales.

Así mismo, el uso de la robótica también se ha venido empleando en el estudio de los potenciales de geometrías complejas y desempeño estructural de la madera, en donde se han explorado sistemas de ensamble complejos y conceptos estructurales como el de la elasticidad activa (por ejemplo, en el pabellón de investigación del ICD-ITKE 2010), en donde la elasticidad de láminas de madera es aprovechada como mecanismo de estabilidad a partir de las propiedades intrínsecas del material. O también, el uso de elementos naturales propios de un lugar determinado para ser empleados como insumos en la fabricación de estructuras complejas, como en el proyecto de exploración “Wood Chip Barn” del taller Design & Make 2015-2016, de la Architectural Association en Inglaterra, que se puede observar en la figura 4-1.

**Figura 4-1:** Fabricación robótica de estructuras complejas con horquetas de madera.

A. Definición de ejes de cada horqueta mediante fotogrametría. B. Optimización topológica de la estructura mediante un algoritmo evolutivo. C. Manufactura de uniones por ruteado con brazo robótico. D. Estructura terminada.



Fuente: <https://vimeo.com/158804700>

Para el caso de la guadua -un material relativamente abundante en Colombia- en donde los procesos constructivos están ligados a las propiedades conocidas del material, pero también a las capacidades del uso de herramienta menor, esto podría significar la superación de limitaciones tradicionales, por ejemplo en sistemas de anclaje o uniones, así como en la experimentación con potenciales no explorados aún en sus procesos constructivos, como la elasticidad o el aprovechamiento de la curvatura natural propia de cada tallo.

Por otro lado, considerando las mencionadas condiciones de trabajo complejas que pueden existir en contextos rurales, el reto de la disponibilidad de la maquinaria digital debe considerar factores como flexibilidad, transporte, resistencia, baja o inexistente disponibilidad de repuestos, inestabilidad de fuentes de electricidad y, sobre todo, bajo costo de producción. Dado que la maquinaria que existe en la actualidad está concebida para entornos de producción industrial, desde ya se podrían empezar a idear prototipos de estos equipos -si bien, aún no con tecnología de punta como la robótica- cumpliendo con las características necesarias para estas condiciones. Ejemplos en casos similares ya se han producido, con finalidades académicas o de divulgación sobre el tema de la fabricación digital como se observa en la figura 4-2.

**Figura 4-2:** Ejemplo de dispositivos e instalaciones portátiles para fabricación digital. A. y B. Suitcase CNC de makeLab. C. FabLab Mobile, remolque equipado con máquinas cnc e impresión 3d.



Fuente: A. y B. <http://make-lab.org/suitcase-cnc> - C. [www.fabfoundation.org](http://www.fabfoundation.org)

### 4.3 Biomateriales y construcción robótica autónoma en sitio

Otro escenario de aplicabilidad en el contexto local, se puede dar a más largo plazo, a través del desarrollo de materiales producidos a partir de modificaciones de organismos biológicos, explotando el potencial en biodiversidad que existe en el país, y la utilización de residuos orgánicos de origen agrícola, desaprovechados en su gran mayoría, que pueden servir como fuente de energía incorporada en la producción de dichos materiales

---

y que pueden ser llevados a la producción de sistemas constructivos. Conjuntamente, la creación de sistemas de dispositivos robóticos autónomos de fabricación aditiva en sitio, pre-programados para trabajar bajo las lógicas de inteligencia artificial colectiva y colaborativa, emplearían los materiales ya mencionados en los procesos constructivos, en los que, además, la toma de decisiones sería supervisada por el constructor (humano), monitoreando todo el proceso inclusive de forma remota.

Como ventajas, se obtendrían construcciones con huella hídrica y de carbono mínimas, puesto que la única energía incorporada sería la de los componentes con que han sido producidos dichos dispositivos robóticos de construcción, ya que su funcionamiento se basaría enteramente en energía solar. El proceso de producción de los materiales de base orgánica, requeriría eventualmente una cantidad mínima de agua, dependiendo de su composición específica.

En la actualidad, desarrollos experimentales, como los que se pueden observar en la figura 4-3, y que inclusive ya están empezando a ser comercializados, tales como los realizados por empresas como “Ecovative” o “Mycoworks”, entre otros, contribuyen en la materialización del concepto *Mycotecture*, propuesto en 2007 por el artista Phillip Ross. Este concepto propone la creación de materiales y estructuras, a partir de micelio (tejido natural de raíces de algunos hongos) y el aprovechamiento de residuos agrícolas como insumo, cuyo producto es además 100% compostable, pero además sin generar huella de carbono. Actualmente ya se producen aplicaciones variadas, como por ejemplo empaques, mobiliario, láminas para construcción (por ejemplo, como aislante térmico o similares a las de aglomerados de madera), en donde ya se están empezando a reemplazar algunos plásticos y aglomerados convencionalmente empleados.

Su integración con la manufactura digital también se ha explorado. El pabellón “Hy-Fi” del estudio de diseño “The Living”, ha sido una prueba de concepto para ello. Para este prototipo diseñado mediante modelado paramétrico, se produjeron 10.000 ladrillos de este tipo, en moldes de tamaño variable producidos por fresado cnc, en donde se dejó “crecer” el material. Otro enfoque similar de producción, se encuentra por ejemplo en la compañía “Biomason”, que produce ladrillos de carbonato de calcio, un compuesto comúnmente encontrado en la naturaleza, mediante bacterias, agregados minerales, otros materiales reciclados y agua.

**Figura 4-3:** Ejemplos de materiales de base biológica.

A. Aislamiento térmico a base de micelio. - B. Ladrillos de carbonato de calcio producidos mediante una reacción bioquímica con bacterias - C. Pabellón “Hy-Fi” del estudio “The Living,” construido con ladrillos de micelio.

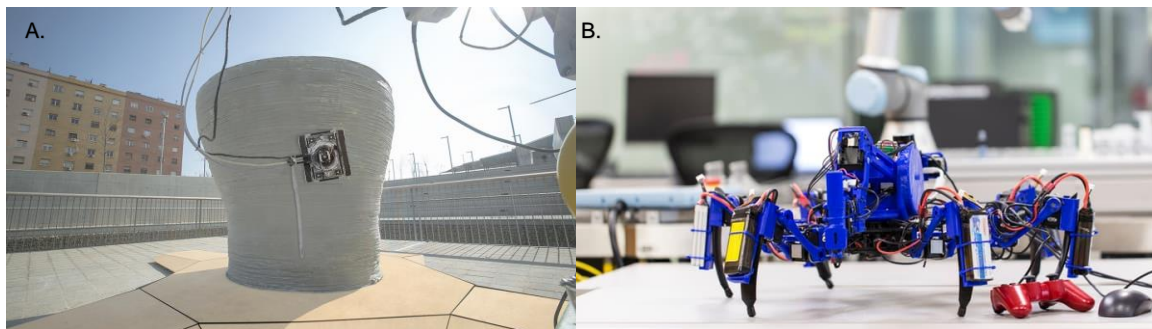


Fuente: A. [www.ecovatedesign.com](http://www.ecovatedesign.com) - B. <http://biomason.com/> – C. <http://thelivingnewyork.com>

En cuanto a las exploraciones que se realizan sobre robótica en sitio, se encuentran algunas investigaciones de prototipos que son capaces entender el entorno físico que los rodea, moverse autónomamente a través de diversas superficies sin consideración de su dificultad, transportar una cantidad significativa del material a emplear en el proceso constructivo y trabajar en equipo interconectándose con dispositivos similares dentro de una área de trabajo determinada, como se pueden apreciar en algunos ejemplo en la figura 4-4.

**Figura 4-4:** Prototipos de robots autónomos para construcción en sitio.

A. “Minibuilders”, un dispositivo que se sujeta por succión a la superficie que construye, en este caso, un compuesto de polímero y mármol. B. Proyecto “SiSpis”, prototipo de robot tipo araña para impresión 3d mediante trabajo colaborativo en sitio, desarrollado por la empresa Siemens.



Fuente: A. <http://robots.iaac.net> – B. <http://www.siemens.com/>

En estos escenarios, algunos de los desarrollos y procesos presentados, en la actualidad se perciben como resultados de investigaciones de un muy alto nivel de sofisticación



tecnológica, que probablemente serán vistos como convencionales dentro de algunos años. Sin embargo, para el caso colombiano lo realmente trascendental hacia el futuro sería entonces, como se ha intentado indicar, lograr alinear los medios de producción y el know how en proceso de democratización tecnológica desde ya, junto con los recursos locales disponibles, orientándolos hacia la resolución de las necesidades locales, pero también, hacia la generación de innovaciones técnicas y tecnológicas. Todo ello podría facilitarse a través de una serie de esfuerzos interinstitucionales, en los que incluso algunas entidades gubernamentales pueden influir desde su capacidad de toma de decisiones y ejecución, ya que, a su vez estas podrían verse beneficiadas.

## 5. Conclusiones

### 5.1 Conclusiones finales

Luego de observar en detalle y comprender mejor el fenómeno del desarrollo y usos de la tecnología digital en el diseño y la construcción, desde un punto de vista global, pero también en el contexto regional y específicamente el colombiano como objeto de estudio, y reconocer que a pesar de la creciente diseminación y apertura de acceso a dichas tecnologías, así como diversos esfuerzos principalmente desde lo académico, algunos factores persisten, retrasando su implementación y posterior normalización en la arquitectura y la construcción locales.

Uno de estos factores, el económico, de naturaleza superior y externa al alcance disciplinar de la construcción, tenderá a desaparecer en la medida en que una paulatina nivelación y actualización tecnológica vaya teniendo lugar en la industria manufacturera. Como se ha observado con el caso de la prefabricación y los sistemas constructivos industrializados, se podría esperar igualmente que la fabricación digital, no tenga efectos negativos ni desplace al modelo productivo predominante, basado en la mano de obra, sino que entre a complementarlo y contribuya al mejoramiento de la calidad de los procesos constructivos y, por extensión, de las edificaciones. De hecho, como sostiene Menges (2006), “la tecnología CAD/CAM puede convertirse en un mecanismo a través del cual, el potencial de la experiencia y métodos existentes sea totalmente alcanzado”. Vale la pena mencionar, que aun cuando tal estado de circunstancias se produzca en la industria manufacturera local, la condición de baja capacidad de asimilación de los avances tecnológicos, tradicional en la construcción, debe ser superada para poder obtener las ventajas de tal incorporación.

---

Sin embargo otros factores como el educativo y el administrativo, deberían estar siendo superados desde ya, con miras a generar el apalancamiento que requiere la industria de la construcción desde el sector académico, y a su vez, este sector debería estar apoyado en la industria de la construcción (mediante el planteamiento de problemas y necesidades, la generación de bases de conocimiento compartidas y la gestión de recursos económicos, entre otras), de modo que entre ambas, se generen aportes innovadores con impacto y relevancia suficiente, para la resolución de problemas críticos de la arquitectura y la construcción en el contexto local. Cabe mencionar que, de acuerdo con Quintero (2015) “el sector de la construcción (en Colombia) está teniendo un momento cúspide en su desarrollo, ha pasado por momentos históricos importantes que han permitido su crecimiento a gran escala, dejando lo artesanal en tiempos anteriores y tratando cada vez más de tecnificar la gestión y la realización de cada uno de sus proyectos.”

El ámbito académico nacional, casi del mismo modo que el de la industria constructiva, padece el rigor de una falta de actualización con la que se están condenando avances tecnológicos que, si bien son externos, comportan hoy en día un alto grado de flexibilidad que permite su apropiación de forma cada vez más rápida. Además de esto, burocracias bien consolidadas en las instituciones, lastran tales procesos de actualización y de paso de producción de la innovación, limitando el alcance de la misión y la visión de entidades comprometidas con la generación del conocimiento.

Por otra parte, al interactuar con entidades e individuos que de una u otra forma están vinculados al tema de este estudio, se obtuvo una visión que extiende la comprensión del contexto y sus dificultades. Fundamentalmente, se trata de un mercado especializado muy pequeño y joven, para el que hay una demanda bastante reducida, y que se intenta abrir paso en medio de una industria tradicionalista, en donde las nuevas tecnologías todavía tienen un rol secundario. Pero, además, en donde quienes podrían ayudar a mejorar sus oportunidades de crecimiento -los arquitectos diseñadores- aún desconocen ampliamente su existencia o no comprenden al máximo las ventajas de su aplicación, e incluso las perciben como una amenaza a los modos de hacer más tradicionales.

Es importante entender que, si bien Colombia ha sido tradicionalmente un país consumidor y no productor de tecnologías, especialmente las digitales, sus industrias creativa, manufacturera y constructiva, deben procurar enfilar sus esfuerzos hacia la

actualización tecnológica, especialmente bajo un esquema de apropiación, más que de adopción, que explore y explote los potenciales de los recursos y condiciones locales, sin dejar pasar la oportunidad de observar los errores y aciertos experimentados en los procesos de creación de otros contextos.

Específicamente, las herramientas de diseño computacional, requieren cada vez más que el diseñador, el constructor e incluso el ingeniero, conjuguen el conjunto de las habilidades y conocimientos tradicionales de su formación y experiencia, con otras mucho menos usuales, como por ejemplo la programación de software. De igual modo, se requiere ganar familiaridad con nuevos instrumentos como los equipos de fabricación digital. En el caso particular de los diseñadores, resulta importante señalar la conveniencia de la adopción de una postura más científica, en el sentido de la exploración dentro de sus procesos creativos, incluso más frente a la actitud artística tan fuertemente establecida por tradición, teniendo presente las nuevas puertas que abren la tecnología digital y otras ramas del conocimiento, tales como las ciencias puras y las aplicadas. Y, por la misma vía, en el caso de los constructores e ingenieros, una mejor comprensión de nuevos enfoques de diseño, posibilitados por la aplicación de las nuevas herramientas y formas de producción, les facilitará su integración dentro de nuevas formas de trabajo colaborativo, resultado de la aplicación de las mismas tecnologías.

Al llegar a este punto, como reflexión final las preguntas que cabe hacer es si arquitectos, ingenieros y constructores en Colombia ¿seguirán siendo espectadores de todo este aluvión de cambios o se harán partícipes del avance y consolidación de la tecnología digital y sus ventajas en la construcción, desde la academia, el diseño y la industria? De ser así, ¿seguirá siendo desde una postura pasiva, como en su adopción, o, por el contrario, será posible hacerlo desde una más activa, como en su apropiación?

## **5.2 Investigación posterior**

A partir de los resultados y reflexiones arrojados por este estudio, un estado de avance puede darse a través de un cambio de enfoque metodológico desde lo cuantitativo, si se quiere, abarcando las mismas unidades de análisis, pero intentando establecer información mucho más definida, que igualmente permita predecir con un mayor grado

de precisión, qué rumbo a corto plazo podría tomar el fenómeno de estudio en el mismo contexto.

El establecimiento de variables tales como el nivel actual de capacidad instalada en la industria manufacturera local o los porcentajes de presupuestos en proyectos de construcción, empleados en desarrollos específicos donde la manufactura digital haya sido empleada, podrían posibilitar la conformación indicadores concretos.

Por otra parte, los mismos tres escenarios potenciales en el contexto local, señalados en esta investigación, fablabs como promotores de proyectos empresariales; herramientas digitales integradas a las tradiciones constructivas locales, y bio-materiales con construcción robótica autónoma, indican en sí mismos pautas para el desarrollo de proyectos de investigación a futuro en el tema, incluso de carácter interdisciplinario, que promuevan su avance e interés en el marco de la producción académica, pero buscando además aplicabilidad directa y en la medida de lo posible comprobable.



## **A. Anexo: Entrevistas**

Entrevistas realizadas a participantes (archivos de audio formato .wav en CD adjunto):

- R. Velasco, comunicación personal, 15 de abril de 2016.
- D. Velandia, comunicación personal, 04 de mayo de 2016.
- R. Hudson, comunicación personal, 04 de mayo de 2016.
- J. Zuleta, comunicación personal, 10 de mayo de 2016.





# Bibliografía

- Benjamin, D. (2012). Beyond Efficiency. En S. Marble (Ed.), *Digital Workflows in Architecture* (pp. 14- 25). Basel: Birkhäuser.
- Bergin, M. (2011, Agosto 21). History of BIM. *Architecture Research Lab*. Recuperado de <http://www.architectureresearchlab.com/arl/2011/08/21/bim-history/>
- Bock, T. & Langenberg, S. (2014). Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process. *Architectural Design*, 84, 88–99. doi: 10.1002/ad.1762
- Cardoso, D. (2011). Esclavos Perfectos: Historia breve de la Ciberarquitectura en MIT (1959-1967). *Dearq Revista De Arquitectura / Journal of Architecture*, 10, 48-59.
- Çil, E. & Pakdil, O. (2007). Design instructor's perspective on the role of computers in architectural education: a case study. *METU JFA 2007*, 2, 24:2, 123-136.
- Davis, D. (2013, Agosto 6). A History of Parametric. Recuperado de <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>
- Davis, D. (2015, Febrero 18). Three Top Firms That Are Pursuing Design Research. *Architect - The Journal of the American Institute of Architects*. Recuperado de [http://www.architectmagazine.com/technology/three-top-firms-that-are-pursuing-design-research\\_o](http://www.architectmagazine.com/technology/three-top-firms-that-are-pursuing-design-research_o)
- Denari, N. (2012). HL23 and the Mania of Accuracy. En S. Marble (Ed.), *Digital Workflows in Architecture*. Basel: Birkhäuser.
- Dunn, N. (2012). Digital fabrication in architecture. London: Laurence King Publishing.
- Eckel, Z. C., Zhou, C., Martin, J. H., Jacobsen, A. J., Carter, W. B., & Schaedler, T. A. (2015). Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. *Science*, 351(6268), 58-62.
- Frazer, J. (1995). An evolutionary architecture. London: Architectural Association.

- Galjaard, S., Hofman, S., & Ren, S. (2014). New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. *Advances in Architectural Geometry 2014*, (pp. 79-93).
- Happold, E., Liddell, W. I., (1976) "Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau" en *The Structural Engineer*, No 7, Volume 54 (July 1976)
- Holden, K. J. (2012). *SHoP: Out of practice*. New York: Monacelli Press.
- Hensel, M. (2013). *Performance-oriented architecture: Rethinking architectural design and the built environment*. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons.
- Hensel, M. & Menges, A. (2006). Differentiation and performance: multi-performance architectures and modulated environments. *Architectural Design*, 76, 60–69. doi: 10.1002/ad.241
- Herrera, P. (2010). Tecnologías disruptivas: programación y fabricación en Latinoamérica. En R. Villazón et al. (Eds.) *SiGraDi 2010: disrupción, modelación y construcción: diálogos cambiantes Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 213-216).
- Herrera, P. (2013) Patrones en la Enseñanza de la Programación en Arquitectura: De la Hetero-Educación a la Auto-Educación en Latinoamérica. En R. Bernal, P. Gómez (Eds.) *SiGraDi 2013 Diseño basado en conocimiento. SiGraDi Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 555-559).
- Herrera, P., Juarez, B. (2012) Perspectivas en los laboratorios de Fabricación Digital en Latinoamérica. En R. Leite, et. al. (Eds.) *SiGraDi 2012. SiGraDi Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 285 - 289).
- Hurtado, E. (2011). *Generación de superficies de cerramiento tipo celosías, basado en la exploración de geometrías tridimensionales y redes espaciales* (Tesis de Maestría en Construcción). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications: Architectural and material techniques*. New York: Princeton Architectural Press.
- Kolarevic, B. (2000). Digital Morphogenesis and Computational Architectures. En Kós, J.; Pessoa, A.; Rodriguez, D. (Eds.) *SiGraDi 2000: Construyendo (n)o Espaço. Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 98-103).
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. New York, NY: Spon Press.
- Kolarevic, B., & Malkawi, A. (2005). *Performative architecture: Beyond instrumentality*. New York: Spon Press.

- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., . . . Oxman, N. (2015). Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2, 3, 92-105.
- Leach, N. (2009). Digital Morphogenesis. *Architectural Design*, 79, 32–37.  
doi: 10.1002/ad.806
- Maing, M. & Vargas, R. (2013) Digital Fabrication Processes of Mass Customized Building Facades in Global Practice. En R. Bernal, P. Gómez (Eds.) SiGraDi 2013 *Diseño basado en conocimiento. SiGraDi Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 415-419).
- Martinez, M. (2006). La Investigación Cualitativa (Síntesis Conceptual). *Revista de Investigación en Psicología*, 9, 123 – 146.
- Materia (2007, Julio 18). Explosion forming. Recuperado de <http://materia.nl/article/explosion-forming/>
- Princeton University (2013) *Evolution of German Shells: Efficiency in Form - Mannheim Multihalle – Hanging Chain model* [Página Web]. Recuperado de <http://shells.princeton.edu/Mann2.html>
- Menges, A. (2006). Manufacturing diversity. *Architectural Design*, 76, 70–77.  
doi: 10.1002/ad.242
- Mertens, D.M. (2005). Research and evaluation methods in special education. Thousand Oaks. Cowin Press/Sage
- Mitchell, W. J., & McCullough, M. (1995). Digital design media. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Moreyra, M., Billington, D. (2014) “Félix Candela and Heinz Isler: A comparison of two structural artists. En Adriaenssens, S., et. al. (Eds.), *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization* (pp. 247-257) New York; London: Routledge
- Oosterhuis, K. (2004). File to Factory and Real Time Behavior in Architecture. En *Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture: Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture ACADIA* (pp 294-305).
- Paoletti, I., & Tardini, P. (2011). Mass Innovation: Emerging technologies in construction. Santarcangelo di Romagna (Rimini): Maggioli.
- Pinto, Y. (2010). La Construcción Metálica en Colombia: Apuntes Sobre su Desarrollo. En *Construcción Metálica*, 1, 28-34.

- Pottmann, H., & Bentley, D. (2007). *Architectural geometry*. Exton, PA: Bentley Institute Press.
- Quintero, J. (2015). *La Formación de la Estrategia de Innovación en el Sector de la Construcción: Un Estudio De Caso* (Tesis de Maestría en Ingeniería Administrativa). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Roudavski, S. (2009). Towards Morphogenesis in Architecture. *IJAC International Journal of Architectural Computing*, 7, 3, (pp. 345-374).
- Scheurer, F. (2012). Digital Craftsmanship: From Thinking to Modeling to Building. En S. Marble (Ed.), *Digital Workflows in Architecture* (pp. 110 - 118). Basel: Birkhäuser.
- SMD Arquitectes (2009, Octubre 22) "Case Study: Mannheim Multihalle." Recuperado de <http://www.smdarq.net/case-study-mannheim-multihalle/>
- Sperling, D. M., Herrera, P. & Scheeren, R. (2015). Migratory Movements of Homo Faber: Mapping Fab Labs in Latin America. En Celani, G., Sperling, D.M., Santos, J. (Eds.) *CAAD Futures 2015 The Next City - New Technologies and the Future of the Built Environment - 16<sup>th</sup> International Conference* (pp. 405-421).
- Stevens, J., & Nelson, R. (2011). Digital Vernacular: Democratizing architectural making. En Ferris, M. (Ed.) *Making Futures 2011 - Interfaces Between Craft Knowledge and Design: New Opportunities for Social Innovation and Sustainable Practice*.
- Knippers, J. (2013, Abril 25). Staedelschule Architecture Class (SAC) Lecture Series 2013. [Archivo de Video] Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=zYtUjVtJDZ8>
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Oxford: Architectural Press.
- Toffler, A. (1984) *The Third Wave*. New York: Bantam, 1984.
- Townsend, A. (2014) On the Spline. En Anderson J., Jackson, M. (Eds.) *International Journal of Interior Architecture + Spatial Design: Applied Geometries*, 3, 48-59. Atrium Press: Nueva York
- Universidade do Porto. (2014). *Robotic Technologies for A Non-Standard Design and Construction in Architecture* (Report Task 1.1.2). Recuperado de <https://dfl.arq.up.pt/portfolio/fct-robotic-construction/>
- Valero, E. (1999). Informática en la Industria Colombiana: Vicisitudes en la Difusión de una Tecnología. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 38, 79-96.
- Vardouli, T. (2012). Computer Of A Thousand Faces: Anthropomorphizations Of The Computer In Design. *Dosya*, 29, 1965-1975.

- Vargas, H. (2010). Panorama de la Construcción Metálica en Colombia. En *Construcción Metálica*, 1, 50-58.
- Velandia, D. (2015) Option One: A Model of Participatory Design to Construct a Rural Social Housing from Digital Fabrication. En eCAADe 33<sup>rd</sup> Annual Conference of Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (pp.531-539).
- Velandia, D. (2013). Proyecto 100/100: experiencia de modelado paramétrico como una opción adaptable de BIM para países en desarrollo. En R. Bernal, P. Gómez (Eds.) *SiGraDi 2014 Design in Freedom. SiGraDi Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (pp. 365-369).
- Velasco, R. (2011). Sobre el uso de Herramientas Digitales dentro de la formación profesional en Arquitectura. En *Alarife*, 21, 60-71.
- Waisman, M. (1995). La arquitectura descentrada. Bogotá: Escala.