

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



Tesis, para obtención de grado del Doctorado en Diseño Facultad de Arquitectura y Diseño

TÍTULO

**Diseño Generativo y fabricación aditiva aplicados a la arquitectura en
Países con economía emergente.**

LGAC: Tecnología del Diseño

Alumna: Mtra. en Dis. Sara Cristina Solache de la Torre

Director de tesis: Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Co- director: Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos

Tutor: Dr. Carlos Roberto Fonseca Ortiz

Lector 1: Dr. René Lauro Sánchez Vértiz Ruíz

Lector2: Dr. Arturo Santamaría Ortega



Tabla de contenido

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	6
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1. <i>Antecedentes</i>	9
1.1.1. Países con Economía Emergente y su desarrollo en la construcción	14
1.2. <i>Pregunta de Investigación</i>	15
1.3. <i>Objetivos de la investigación</i>	16
1.4. <i>Propósito.....</i>	16
1.5. <i>Hipótesis</i>	17
1.7. <i>Método</i>	18
2. DISEÑO GENERATIVO EN LA ARQUITECTURA	20
2.1. <i>Marco Teórico.....</i>	20
2.2. <i>El diseño generativo a lo largo de la historia de la arquitectura.</i>	25
2.3. <i>Procesos de la Arquitectura vs. Diseño Generativo</i>	27
2.4. <i>Herramientas del Diseño Generativo.....</i>	33
2.4.1. Diseño Paramétrico y su relación con la Arquitectura Generativa	36
2.5. <i>Diseño Generativo en la Actualidad.....</i>	38
2.5.1. Clasificación de Prototipos.....	39
2.5.2. Procesos de Producción	41
3. ESPACIOS PÚBLICOS; PABELLONES DE EXPOSICIÓN	43
3.1. Espacio público; concepto y función	43
3.1.1. <i>La exposición como lenguaje visual</i>	43
3.1.2. <i>Pabellones de exposiciones.....</i>	44
3.1.3. <i>Arquitectura funciona bajo necesidades o tendencias</i>	46
3.1.4. <i>Contextualismo</i>	46
3.2. Estructuras Generativas Materiales, fabricación y diseño digital	48
3.2.1. <i>Arquitectura Biomimética</i>	48
3.2.2. <i>Estructura Modular Generativa en pabellones México</i>	50
3.3. Industrialización en la construcción.....	52
3.3.1. <i>Estructuras prefabricadas</i>	53
3.3.2. <i>Montaje.....</i>	54
4. IMPRESIÓN 3D EN CONCRETO Y SU RELACIÓN CON EL DISEÑO GENERATIVO	56



4.1.	Concepto.....	56
4.2.	Tipos de Impresión y Funcionamiento	58
4.3.	Identificación de problemas y ventajas en el diseño generativo.	60
4.4.	Entrevista a expertos	61
4.5.	Propuesta Metodológica de Diseño Generativo y fabricación aditiva.....	63
5.	APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO (CASO DE ESTUDIO)	66
5.1.	Caso 1. Optimización de esfera.....	67
5.1.1.	Ciclo de vida de la madera	70
5.2.	Caso 2 Diseño de Pabellón.....	71
5.2.1.	Módulos generativos	73
5.2.2.	Pabellón	75
5.3.	Comparación.....	77
5.4.	Relación de elementos y medición.	78
5.4.1.	Estudio de solarimetría y su aplicación	79
5.4.2.	Aprovechamiento hídrico.....	83
5.4.3.	Cálculo Estructural	87
5.4.4.	Confort usuario	92
6.	DISCUSIÓN Y PROTOTIPOS FINALES	93
6.1.	Discusión.....	93
6.2.	Prototipo Final	93
6.3.	Limitantes de la investigación	95
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES.	96
	Referencias.....	97
	Anexos	103



RESUMEN

La presente tesis muestra un análisis y evaluación de la aplicación del diseño generativo en el mundo. Muestra como se ha aplicado mediante la utilización de la fabricación aditiva y como ha funcionado de manera exitosa donde se desarrolla.

El objetivo de la investigación es comprobar mediante datos verídicos que la metodología planteada sobre la aplicación del diseño generativo en un país con economía emergente funciona y que permite el desarrollo de obras generativas sustentables en México, funcionando en favor del usuario y del entorno donde se desarrolla.

El primer capítulo muestra los antecedentes sobre el diseño generativo, así como el desarrollo en la construcción de los países con economía emergente, también se presentan objetivos, hipótesis y el método utilizado para desarrollar la presente investigación.

El segundo capítulo explica como ha evolucionado el diseño generativo en la arquitectura, que herramientas se han utilizado y como han sido los procesos de producción de la misma. En los capítulos tercero y cuarto se enfatizan en explicar la importancia de los espacios públicos en la sociedad y se muestran de manera gráfica los principales pabellones con diseño generativo en el mundo, la conceptualización que se ha utilizado como la biomimética y el contextualismo. Se mencionan los tipos de impresión 3D y como se ha llevado a mayor escala como la impresión 3D de concreto. En esta parte se visualizan los resultados de las entrevistas a expertos realizadas, donde se comprueba que el diseño generativo es una realidad y que funciona adecuadamente para el diseño arquitectónico. En el capítulo 5, se comprueba la hipótesis, es la sección donde se aplica la metodología planteada a un caso de estudio real, donde se diseñó un pabellón mediante la utilización del diseño generativo. Se muestra el análisis de cada variable para su funcionamiento y se obtiene un pabellón generativo sustentable. En el último capítulo se mencionan las limitantes y conclusiones de la investigación. Se responde al objetivo general, se enuncian las recomendaciones para continuar con la investigación y aumentar el valor de la investigación.

Palabras Clave:

Diseño Generativo, Fabricación Aditiva, Biomimética, Sustentabilidad, Impresión 3D



ABSTRACT

This thesis shows an analysis and evaluation of the application of generative design worldwide. It shows how it has been applied through additive manufacturing and if it has worked successfully where it is developed.

The objective of the research is to verify through true data that the methodology proposed on the application of generative design in a country with an emerging economy works and that it allows the development of sustainable generative works in Mexico, working in favor of the user and the environment.

The first chapter shows the background on generative design, as well as the development in the construction of countries with emerging economies, objectives, hypotheses, and the method used to develop this research are also presented.

The second chapter explains how generative design has evolved in architecture, what tools have been used, and how the production processes have been like. The third and fourth chapters emphasize the importance of public spaces in society and graphically show the main pavilions with generative design in the world, the conceptualization that has been used such as biomimicry and contextualism. The types of 3D printing are mentioned and how it has been taken to a larger scale, such as 3D concrete printing. In this part, the results of the interviews with experts carried out are visualized, where it is proven that generative design is a reality and that it works adequately for architectural design.

In chapter 5, the hypotheses are verified, it is the section where the proposed methodology is applied to a real case of study, where a pavilion is designed using generative design. The analysis of each variable for its operation is shown and a sustainable generative pavilion is obtained. In the last chapter, the limitations and conclusions of the research are mentioned. The general objective is fulfilled, and the proposed recommendations are stated to continue with the research.

Keywords:

Generative Design, Additive Manufacturing, Biomimicry, Sustainability, 3D Printing



INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el ser humano ha creado herramientas que nos han ayudado a darle forma a nuestro mundo y definir nuestra estética, pero también han limitado nuestra imaginación. Hasta ahora, si no se podía dibujar algo, era imposible imaginarlo.

Anteriormente los arquitectos desarrollaban sus diseños basándose en su inspiración personal y en su sentido de belleza, actualmente estamos en el avance tecnológico que nos ha permitido desarrollar herramientas que pueden automatizar procesos. El diseño arquitectónico permite seguir un método con la finalidad de afrontar las necesidades y requerimientos actuales. Y todo esto mediante el Diseño Generativo.

El diseño generativo es un proceso para generar formas automáticamente en el que el arquitecto define los objetivos mediante algoritmos (instrucciones): se desarrollan por variables que las definen.

En el diseño generativo se pueden utilizar elementos iniciales: naturales o artificiales, orgánicos o inorgánicos, químicos o mecánicos, conceptuales.

El diseñador no interacciona con los materiales y productos en una obra directa, pero sí a través del sistema creado y se crean formas a partir de un conjunto de reglas y variables de transformación preestablecidas. Cada diseño va con los parámetros definidos de acuerdo con el contexto donde se desarrolla.

Mediante los algoritmos se pueden generar formas, especialmente de orden estético, por lo que se los conoce como sistema formal. Cuando se combina el diseño generativo con el surgimiento de nuevos modos de manufactura, como la fabricación aditiva (impresión 3D), tenemos acceso a recursos de producción, los métodos de manufactura tradicionales requieren que se produzca una enorme cantidad de producción para que sea rentable, lo que pequeños diseñadores sin accesos a recursos de producción no podrían competir. Con el diseño generativo eso ha cambiado ya que permite el resurgimiento de la manufactura, todo lo que se diseña se verá afectado incluido el entorno construido ya que se puede equilibrar el tipo de material, la resistencia y el consumo de energía permitiendo aminorar el desperdicio y tener un mayor control de costos.



CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA





1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Nuestra formación como arquitectos es singularmente diversa, ya que algunos durante su experiencia profesional abarcan aspectos de un alto nivel técnico, abstracto y objetivo, como otros de naturaleza más sensible, intuitiva y subjetiva. Esto nos lleva a pasar por alto los materiales o enfocarnos totalmente en el diseño, sin entender realmente la profundidad y complejidad de lo que conlleva construir una obra.

En la actualidad la construcción de edificios en el mundo es necesaria, pero inconvenientemente de alto impacto ambiental, por lo que se considera de suma importancia reducir al máximo los distintos impactos ambientales que conlleva la construcción de millones de metros cúbicos que cada año se realizan de una gran diversidad de edificios y de cualquier otro tipo de infraestructura a nivel mundial. La industria de la construcción de edificios es una de las que más contamina el ambiente (Villas, 1995) pero también es una de las que mayor riqueza económica, progreso y bienestar social produce en el mundo. (Hernández, 2015)

El contexto de cualquier obra establece límites o brinda oportunidades y será el arquitecto quien tome el camino que mejor responda a su entendimiento del problema, ideología o necesidades, las herramientas de las que disponemos son cada día más: materiales, técnicas y programas informáticos que están a nuestro alcance. En las últimas décadas las tecnologías digitales han extendido su presencia a casi todos los ámbitos de nuestra existencia. Esta investigación parte de la arquitectura y su relación con los métodos alternativos de diseño.

La aparición de la computadora acarrea a la arquitectura un cambio radical en tres aspectos: espacio, lugar y tiempo. Estas características del espacio, que ahora se estudian en una computadora, dan una nueva forma de ver la arquitectura. Dando una mayor exactitud en los aspectos formales, funcionales y constructivos. (Souza, 2020)

La relación que existe entre forma y estructura es una condición irrevocable de cualquier proyecto de arquitectura.



Hoy en día se requiere el ahorro de recursos de todo tipo, no solamente en las etapas de uso, operación y mantenimiento de los edificios; sino también desde su diseño y construcción, por lo tanto, un diseño adecuado de las distintas partes de los edificios traerá como consecuencia mejores productos en cuanto a diseño y construcción.

El diseño generativo es un sistema relativamente nuevo, permite encontrar la mejor opción para un diseño que cumpla con los requisitos de desempeño esperados. Al diseño generativo actualmente se le conoce como el diseño del futuro, ya que al utilizarlo se proporcionan diseños innovadores, añadiendo valor, reducción de peso, volumen y costo; mejorando así su funcionalidad. Las tecnologías de diseño, análisis y fabricación que existen actualmente potencian los procesos integrados entre arquitectos e ingenieros; logrando que desde la fase inicial de un proyecto se vincule la generación de formas y la evaluación de comportamientos estructurales, estableciendo una nueva metodología proyectual interdisciplinaria.

1.1. Antecedentes

El autor M. en Arq. Xavier Burneo en su tesis para la obtención del grado de Doctor en Arquitectura, con el título “Desafíos en el presente y futuro de las tecnologías digitales: lo generativo un paradigma en el diseño arquitectónico” hace un análisis de como se ha creado el diseño generativo a lo largo de la historia, la metodología de este trabajo es una selección de propuestas de diferentes autores sobre el tema de las tecnologías digitales y el manejo de procesos de diseño basado en conceptos de diseño generativo en el contexto de la arquitectura.

Desde finales de los años sesenta se empezaron a desarrollar los primeros sistemas gráficos computarizados CAD (diseño asistido por ordenador) y desde aquí los arquitectos se han apoyado en la informática, la inteligencia artificial y las estrategias de resolución de problemas, basados en la optimización del diseño, automatización de las tareas de diseño y generación creativa en todos los campos de diseño, ya sea profesional o académica.

El diseño generativo se empezó a utilizar con los arquitectos Félix Candela, Gaudí, comenzaron a romper la rigidez de la arquitectura y a utilizar formas orgánicas.

Pero a partir de 1990 es donde se inicia a desarrollar el diseño generativo. Se crearon obras que al público le gustaron y se hicieron sinónimo de una arquitectura de vanguardia, los principales arquitectos de esta época fueron Rem Koolhaas, Peter Eisenman y Zaha Hadid. Y es hasta 1999 que el arquitecto Peter Eisenman con el proyecto “Quai Branly Museum” (Figura 1 y 2) comienza formalmente a utilizar técnicas generativas. (Burneo, 2017)



Figura 1 y figura 2: Museo Quai Branly, (Nouvel, 2006)

La Arquitectura ya no queda en un espacio utópico, sino que las ideas desarrolladas a través de la programación y diagramas en la computadora pueden ser ahora construidas a través de fabricación digital, además el arquitecto ya no solo piensa en construir con materiales tradicionales sino con múltiples materiales con diferentes características; ejemplo, la nanotecnología, los biomateriales ampliando con ello los aspectos formales. (Ortega, 2009)

Desde ese entonces los arquitectos comenzaron a usar una técnica llamada scripting (o programación) para capturar la geometría creada por las computadoras y manipularla de nuevas formas, dando origen a una nueva generación en el diseño y construcción de edificios. Las computadoras acabaron con la tiranía del ángulo recto y abrieron paso no solo al diseño, sino también a una nueva forma de construcción.

Estos scripts impulsaron los programas que se utilizan actualmente como AutoCAD y Rhino, hacen posible diseños más complejos y ambiciosos, como el Centro Heydar Aliyev de Zaha Hadid Architects. (figura 3 y 4)



Figura 3 y 4: Centro Heydar Alivev. Realización estructura / fachada, Arquitecta: Zaha Hadid. (Coarins, 2022)

Pero los scripts que se utilizan hoy son más sofisticados que controlan una gama mucho más amplia de herramientas empleadas en la construcción y que ha dado lugar a una nueva estrategia: la construcción y el diseño generativo.

Lo más importante de este sistema de diseño es la conexión que hay entre los procesos de diseño y construcción que las herramientas generativas hacen posible.

Actualmente los métodos contemporáneos de diseño y análisis asistido por computadora han promovido la definición de formas en función de sus capacidades. Uno de los principales referentes ha sido Mutsuro Sasaki, utilizando métodos de análisis sensibles y optimización estructural evolutiva extendida. (Lyon & García, 2013)

En la tesis titulada “Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico” de la Universidad Politécnica de Valencia presentada por la arquitecta Raquel Velasco, menciona el proceso de diseño tradicional vs. el proceso de diseño generativo. En el diseño tradicional inicia con una idea por parte del diseñador, con ella, pretende llegar a una solución. Una vez obtenida la solución, el diseñador evalúa y decide si es lo que esperaba



o no. Si no lo es, el diseñador cambia aquello de la solución existente que no se ajusta a la idea y crea una nueva solución, este proceso se repite hasta que se alcanza el resultado.

El proceso del diseño generativo varía en algunos aspectos con respecto al proceso de diseño clásico; el cual parte de una idea, seguido por la definición de las reglas o parámetros iniciales, en esta parte de proceso se inicia con la formulación de los algoritmos mediante la utilización de un software de computadora. Después mediante esta programación se desarrolla la estructura genética del diseño o proyecto, que dará forma a la idea y finalmente se obtiene una solución para su aplicación en la construcción.

La parte más importante y que diferencia ambos procesos; es que en el diseño generativo se obtiene una solución modificable que evita que el diseñador tenga que volver al principio, es decir, a la idea, para generar una nueva solución. Ya que solo se requiere de modificar el conjunto de reglas o algoritmos y cambiar los diferentes parámetros.

Este trabajo de investigación nos muestra como los proyectos arquitectónicos actuales muestran únicamente el resultado final del proceso de diseño, pero no el proceso de modelado mediante el cual se ha llegado a esa representación lo cual impide su automatización. Como consecuencia de este proceso lineal cada modificación conlleva una reconstrucción de la representación. El diseño generativo permite la creación de diversos diseños adaptables a diferentes situaciones. (Velasco, 2015)

El diseño generativo no tiene límites, ayuda a dejar atrás las formas geométricas más comunes creando configuraciones orgánicas, continuas y armónicas. Al aplicar esta técnica de diseño a diferentes escalas como puede ser la arquitectura, el interiorismo, el diseño industrial, etc., se logran resultados futuristas e inéditos con un recuerdo a las formas de naturaleza.

El desarrollo del diseño utilizando técnicas tecnológicas tiene mucho potencial, crea obras que incluso pueden salvar espacios públicos mejorando su imagen, cuidando el medio ambiente y dando un servicio a la comunidad como en “Rapana” una biblioteca urbana en

Varna Bulgaria, se utilizaron más de 200 piezas de madera para la construcción de una biblioteca urbana. Diseñada por el estudio Downtown. (Figuras 5-9)

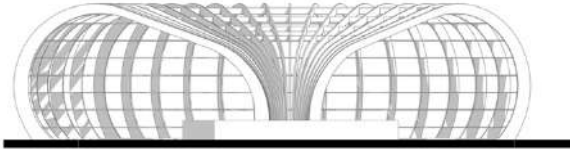


Figura 5: Plano de alzado. (Remón, 2020)

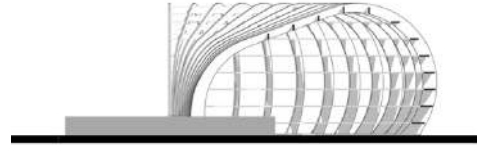


Figura 6: Alzado Lateral (Remón, 2020)

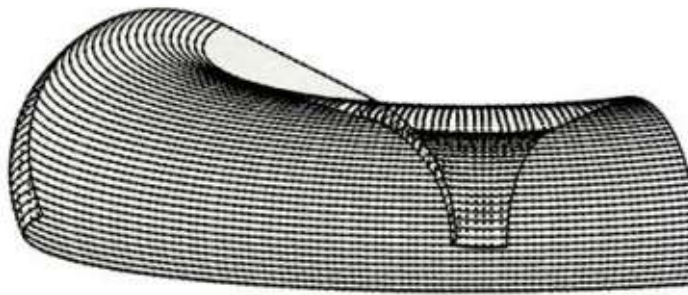


Figura 7: La construcción abstracta se desenreda de un solo punto focal y se desarrolla en un semicírculo mientras se crea un espacio público y al mismo tiempo estantes para colocar libros. (Remón, 2020)

"Rapana" se diseñó utilizando las herramientas de diseño paramétrico Rhinoceros 3D y Grasshopper, que brindan a los arquitectos la posibilidad de probar diferentes formas y variaciones (Figuras 19 y 20).



Figura 8: Desarrollo en 3D. (Remón, 2020)



Figura 9: “Rapana” Biblioteca urbana en Varna, Bulgaria. (Remón, 2020)

El diseño generativo no se trata solo de automatizar un proceso, se trata de hacerlo de manera inteligente “artificialmente inteligente”.

1.1.1. Países con Economía Emergente y su desarrollo en la construcción.

Los países con economía emergente se consideran países en vías de desarrollo, es una nación que va saliendo del subdesarrollo. Ya que tiene un panorama económico favorable.

Los índices que se utilizan para considerar una economía emergente son: economía, desarrollo industrial e índice de Desarrollo humano (alfabetización, acceso a servicios básicos y libertades individuales. (Gruss, 2017)

Normalmente la categoría de países con economía emergente son los establecidos por instituciones que estudian el desempeño de los mercados, se van estructurando de acuerdo con que tan prometedor es cada uno. Los más conocidos son Morgan Stanley Capital Investment (MSCI), Banco Mundial, ONU, etc.

Las características que debe tener un país, y que sea catalogado como emergente son:

- Crecimiento económico
- Industria en progreso
- Internacionalización económica: presencia de empresas nacionales fuera del país.



- Mayor Influencia política: apertura democrática que de estabilidad a largo plazo y seguridad a los inversionistas.
- Aumento poblacional

Los países con economía emergente,

Brasil, China, Chile, India, Sudáfrica, Malasia, México, Polonia, Perú, Filipinas y Egipto.

(Máxima, 2022).

Al ser país con economía emergente tiene ciertas ventajas ya que tiene la oportunidad de obtener ciertos beneficios económicos; es decir tienen acceso a financiamiento internacional y mayor oportunidad de exportar sus productos a nivel internacional. Ayudando a tener un aumento en el turismo. De igual forma también tiene sus desventajas ser una economía emergente ya que no podemos olvidar que es un país subdesarrollado también conocido como “tercer mundo”, no debe de haber perjuicios por ser considerado nación emergente, pero si debemos de reconocer que las economías aún no son autosustentables.

La industria de la construcción es una gran oportunidad de desarrollo para los países con economía emergente ya que la inversión en la construcción genera una gran cantidad de empleos.

En el año 2021-2022 en la industria de la construcción mundial se contabilizan 250 millones de trabajadores es decir 7.7% del total del empleo, específicamente por cada millón de dólares invertido se genera un promedio de 97 empleos en México. (Arteaga, 2021)

1.2. Pregunta de Investigación

¿Cuáles son las principales ventajas para los países con economía emergente al implementar la construcción de espacios públicos sustentables mediante el uso de una propuesta de diseño generativo?



1.3. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Identificar cuáles son las principales ventajas para el diseño sustentable de espacios públicos mediante la implementación de una propuesta arquitectónica generativa, analizando el potencial de la Fabricación Aditiva y aplicarlo a un país con economía emergente.

Objetivos Específicos

- ◆ Investigar y recabar información sobre los métodos y sistemas de construcción aplicados en el diseño generativo, que se utilizan actualmente.
- ◆ Especificar las principales ventajas del diseño generativo en los países donde se utiliza.
- ◆ Realizar una comparativa de la construcción tradicional vs. el diseño generativo y determinar qué ventajas tendría adaptar el diseño generativo al sistema de construcción mexicano.
- ◆ Desarrollar una metodología adecuada para su aplicación en el diseño arquitectónico actual de México.
- ◆ Diseñar una propuesta arquitectónica con criterios climáticos, constructivos y recolección hídrica; generar la documentación necesaria para su construcción a nivel de anteproyecto.

1.4. Propósito

Promover la implementación del diseño y la construcción de espacios públicos sustentables en México, mediante el uso de una propuesta de diseño generativo.



1.5. Hipótesis

Si se implementa una propuesta generativa en un diseño sustentable de espacios públicos en México, entonces se reduce el consumo de material, se mejorará la calidad y funcionalidad, así mismo se disminuye el impacto ambiental.

1.6. Justificación

El desafío ecológico es uno de los ejes determinantes de nuestra época. Su impacto sobre la arquitectura y el urbanismo contemporáneos contempla los mismos conceptos de diseño, técnicas y herramientas que permiten a los arquitectos intensificar la complejidad comunicacional del medio ambiente y sus medios de reconstrucción.

Se ha comprobado que se puede reducir significativamente la cantidad de material. Dando como resultado ventajas derivadas, como reducir la huella de carbono en la construcción. La estructura debe actuar como guía del diseño, se requiere de un control del diseñador para humanizar esos datos abstractos. Sin los conocimientos estructurales y arquitectónicos estas formas estarán vacías. (Martínez, Mendoza, & Escobedo, C., 2006)

El diseño generativo es un campo de investigación de rápido crecimiento, donde intervienen distintas áreas como las matemáticas, ciencias computacionales, ingeniería y diseño.

Los principales beneficios del Diseño Generativo en la Arquitectura son:

- *Reducción de Peso y volumen:* gracias al diseño generativo se podrán desarrollar estructuras mucho más ligeras y menos voluminosas, manteniendo las propiedades necesarias para su funcionamiento; incluso puede mejorarlas.
- *Maximizar la Resistencia:* otra oportunidad que nos presenta el diseño generativo es maximizar la rigidez lo cual nos permite desarrollar estructuras más resistentes dentro del espacio de diseño definido y del material que le hayamos asignado.
- *Reducción de Costos:* el costo se reduce notablemente ya que se minimiza el material necesario para la fabricación como la reducción en tiempos de elaboración.
- *Diseños orgánicos más atractivos:* gran parte del funcionamiento del diseño generativo se basa en la manera de actuar de la naturaleza por lo que los diseños



pueden presentar formas orgánicas, las cuales no sólo son óptimas para el funcionamiento sino visualmente son mucho más atractivas e innovadoras.

1.7. Método

El tipo de investigación fue **Mixta**, de fuente *Documental*, mediante una investigación de estudios de antecedentes para conocer lo que existe sobre el tema y definir el punto de partida de la investigación. También la investigación fue de *Campo*, ya que se estudió el objeto de estudio en su medio natural, es decir se analizaron las construcciones específicamente espacios públicos que fueron diseñados con un modelo generativo y son sustentables, se estudiaron las cualidades del diseño y se identificaron las principales ventajas del diseño generativo en comparación con el diseño tradicional que se utiliza actualmente en México.

Proceso metodológico: parte de una selección de propuestas de diferentes autores sobre el tema de tecnologías digitales y el manejo de procesos de diseño basados en conceptos de diseño generativo, se plantean propuestas de conceptos de diseño generativo como alternativa a los procesos de diseño tradicional.

Herramientas:

Documental: Estudios Antecedentes- Marco teórico; Objetivo- conocer que existe y a partir de qué punto partirá la investigación, plantear y diseñar metodología de investigación.

Campo: Encuestas a expertos; para conocer si la aplicación del diseño generativo en México es la adecuada y acceso a la información de construcciones de espacios públicos que fueron diseñados con un modelo generativo y sustentables, con el fin de identificar las ventajas que tiene en comparación con el diseño tradicional que se utiliza en México.



CAPÍTULO 2

DISEÑO GENERATIVO EN LA ARQUITECTURA





2. DISEÑO GENERATIVO EN LA ARQUITECTURA

2.1. Marco Teórico

El arquitecto mexicano Javier Senosiain menciona que un concepto es la representación simbólica de una idea abstracta y general. Senosiain es uno de los principales representantes de la arquitectura orgánica en México, la finalidad de sus obras es encontrar la armonía entre el hábitat del hombre y el mundo natural. (CNN, 2022)

Senosiain menciona que la arquitectura orgánica se caracteriza por ser más libre, más espontánea que la tradicional.

El diseño generativo es un proceso de creación en el que el arquitecto define los objetivos que busca el proyecto mediante algoritmos.

El objetivo del diseño generativo es facilitar la toma de decisiones, permitiendo al arquitecto valorar diferentes opciones de proyecto en poco tiempo y analizar la repercusión que esta decisión tiene en el resultado.

Actualmente los métodos contemporáneos de diseño y análisis asistido por computadora han promovido la definición de formas en función de sus capacidades. Uno de los principales referentes ha sido Mutsuro Sasaki, utilizando métodos de análisis sensibles y optimización estructural evolutiva extendida. (Lyon & García, 2013)

Diversos ejemplos con técnicas generativas han sido desarrollados por los ingenieros, principalmente por el ingeniero Mutsuro Sasaki y Toyo Ito; el caso más significativo es el Centro de Convenciones de Qatar de 40,000m² con una losa superior de 250m de largo por 110 de ancho, sostenido por dos “árboles” metálicos (Figura 11).



Figura 10: Centro de Convenciones de Qatar (Arata, 2011)

Otra obra representativa es el Crematorio ubicado en Japón, diseñado por Toyo Ito en colaboración con el ingeniero de estructuras Mutsuro Ito, esta obra ha llevado el diseño a un nivel superior. En el que el arquitecto Toyo Ito crea una estructura formal “flotando” sobre el paisaje (Figuras 11-13).

El diseño de la forma que estoy defendiendo implica la generación de formas estructurales racionales con ayuda de programas de cómputo, mediante el uso de principios de evolución y autoorganización de los seres vivos desde el punto de vista de la ingeniería” (Sasaki, 2005)

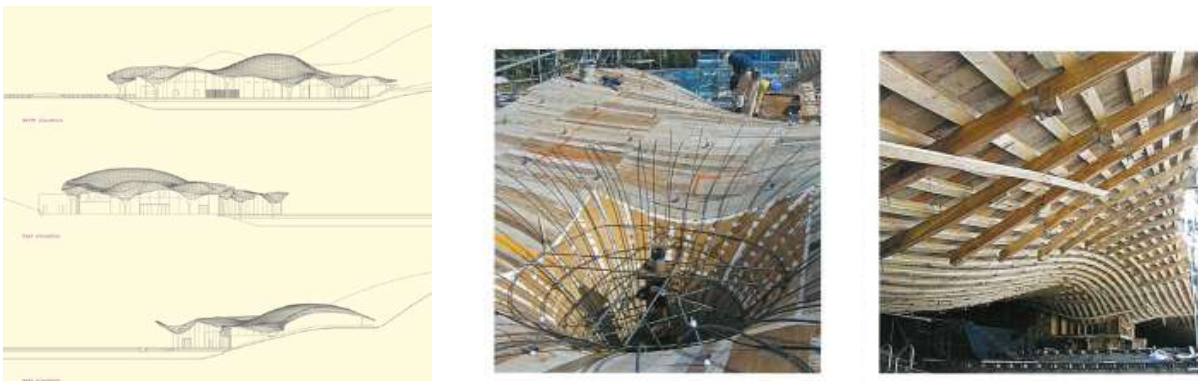


Figura 11,12,13: Diseño estructural del Crematorio, Kakamigahara; ubicado en Kagamiyagahara Gifu, Japón en el año 2006 (delinevietnam, 2015)



Figura 14: Crematorio Kakamigahara, fotógrafo Shinkenchiku Sha (Viva, 2016)

Otras obras representativas del diseño generativo son:

Pabellón de la Serpentine Gallery 2002 en Londres (Figura 15), diseñado por el arquitecto Óscar Niemeyer, la superficie exterior se reviste alternando paneles de aluminio y de vidrio, que siguen las líneas marcadas por las piezas estructurales de acero.

Es una caja con base cuadrada que se sustenta mediante un armazón de piezas planas de acero entrecruzadas, donde cada elemento funciona de manera independiente formando un sistema, su combinación está basada en cálculos matemáticos precisos. (Viva, 2016)



Figura 15: Pabellón de la Serpentine Gallery 2002, Londres, Fotógrafo Daici Ano (AV, 2014)

La arquitectura en conjunto con otras disciplinas puede lograr obras con mucho potencial sin importar el tamaño. Un ejemplo es el “Nature Boardwalk at Lincoln Park Zoo” (Figuras 17 y 18), es un pabellón fabricado de madera que muestra la unión de la arquitectura con el hábitat natural y las personas, es un destino popular al aire libre con un paisaje de aprendizaje para los residentes de la ciudad, su diseño esta tan completo que es totalmente funcional y autosuficiente para la infraestructura de aguas pluviales de Chicago.

En conjunto, el diseño mejora la calidad del agua y la variedad de plantas para un hábitat animal mejor y más diverso. Reduce la dependencia de la infraestructura de la ciudad que envejece y crea un entorno educativo experimental al aire libre. (Gang, 2015)



Figuras: 16y 17: Nature Boardwalk at Lincoln Park Zoo (Gang, 2015)

El uso del diseño generativo desde la etapa del diseño ofrece una visión temprana de la forma óptima de la estructura para la definición de una máxima resistencia con una reducción de masa considerable donde a partir de una forma básica se definen las condiciones reales.

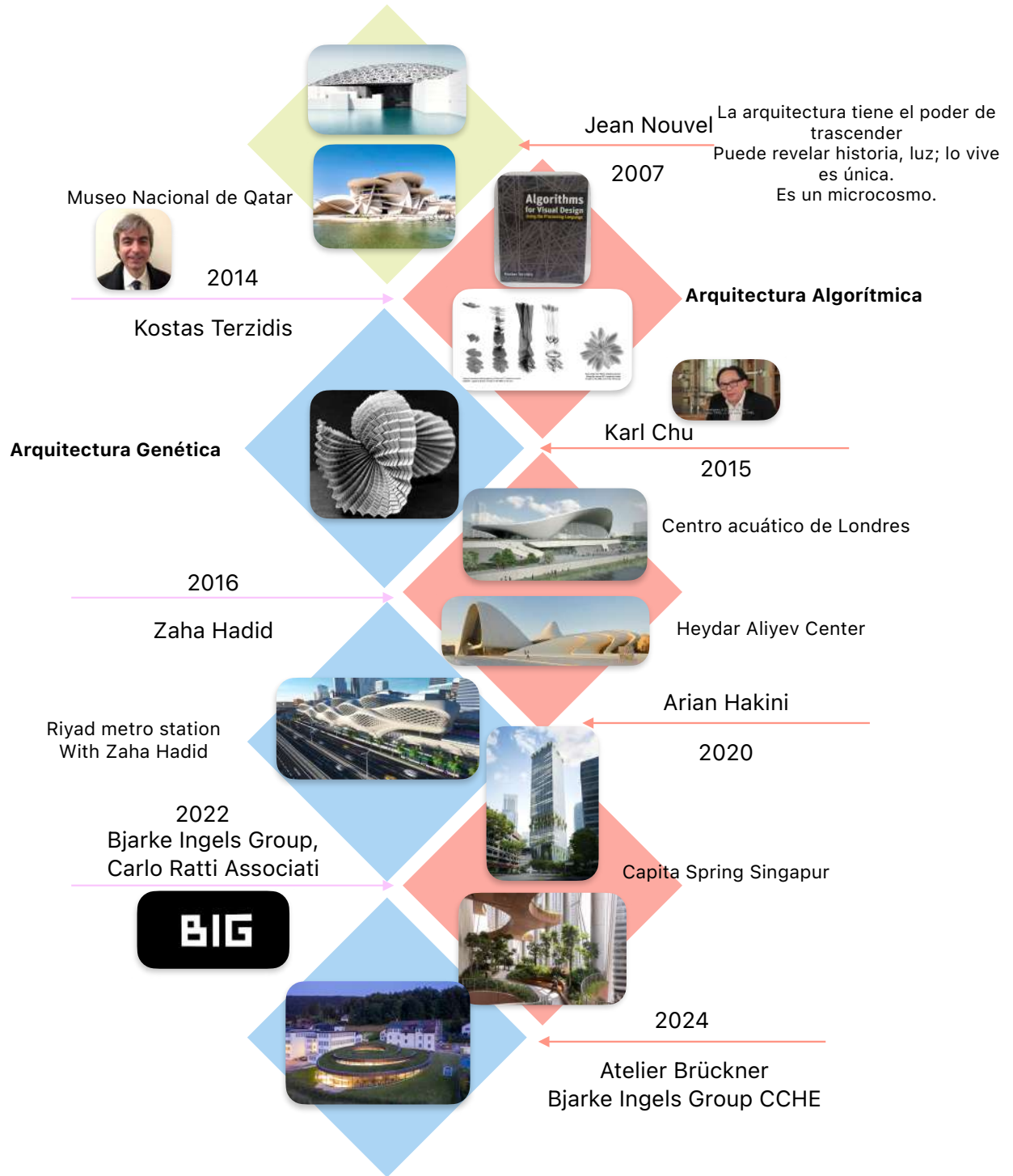


En general el diseño generativo permite al diseñador desarrollar un sistema codificado (adaptable y modificable) capaz de evaluar y dar alternativas a problemas planteados. De acuerdo con parámetros preestablecidos (sistema constructivo, orientación, adecuación al terreno, etc.)

La utilización de algoritmos facilita el análisis, ajusta el espacio dentro de una nueva visión del mundo. No tiene como objetivo solo desarrollar formas complejas, sino que busca la eficiencia en el desarrollo del proyecto.

2.2. El diseño generativo a lo largo de la historia de la arquitectura.





Figuras: 18 : Línea del tiempo de la arquitectura y el diseño generativo, Fuente: Elaboración propia.



2.3. Procesos de la Arquitectura vs. Diseño Generativo

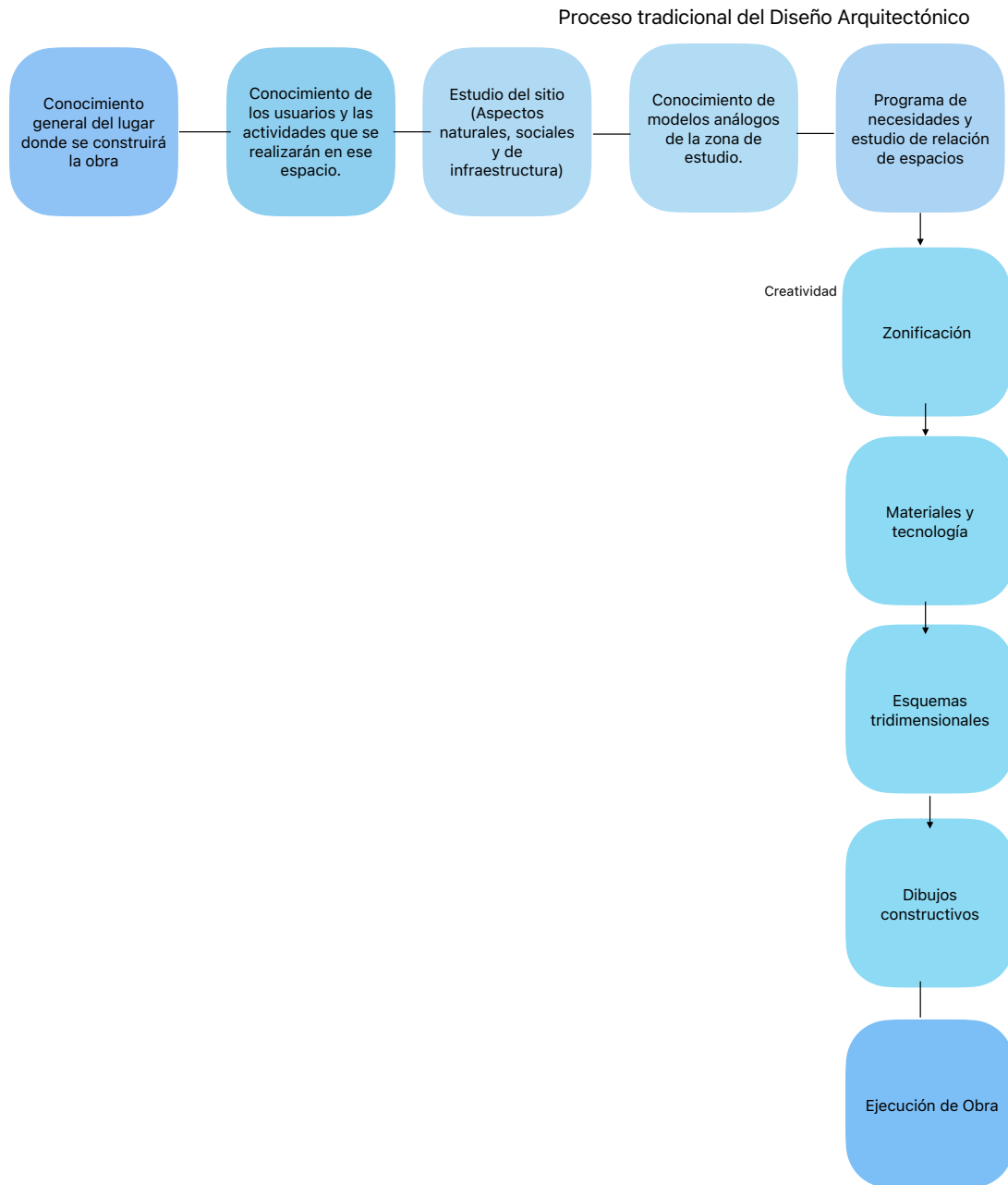
Geoffrey Broadbent, director de la escuela de arquitectura de Portsmouth, menciona en su libro Metodología del diseño arquitectónico (1971), el proyecto de arquitectura difícilmente posee una secuencia única de tareas diferenciables y ordenadas, debido a que, entre el problema y la solución, normalmente, se mantiene una continuidad interactiva.

El diseñador debe dejar de priorizar la forma como elemento inaugural del proceso de diseño, lo esencial que le da forma al proyecto son las relaciones lógicas que a partir de estas se constituyen las relaciones geométricas que se convertirán en variables, parámetros y algoritmos que generen soluciones a los problemas del proyecto.

Las técnicas paramétricas colaboran en el diseño de un proyecto arquitectónico en diferentes aspectos: en la definición de la forma, que depende de los antecedentes; para conciliar aspectos formales, según unos criterios específicos; y para refinar características específicas de los aspectos generales ya definidos.

Actualmente el proceso de diseño que se utiliza en México es muy antiguo, no tiene ninguna etapa en la que le permite al diseñador un control e innovación en el diseño. Claro que en la actualidad y aquí en México ya se están utilizando herramientas de diseño con mayor innovación como lo es REVIT que permite tener una planeación de obra con la conceptualización de BIM, es un gran paso que nos permite a los diseñadores mexicanos entender que la innovación en la arquitectura ya es una realidad y su potencial es enorme.

A partir del análisis de la ejecución de algunas obras arquitectónicas aquí en México, se presenta la metodología del proceso de diseño que se utiliza actualmente.

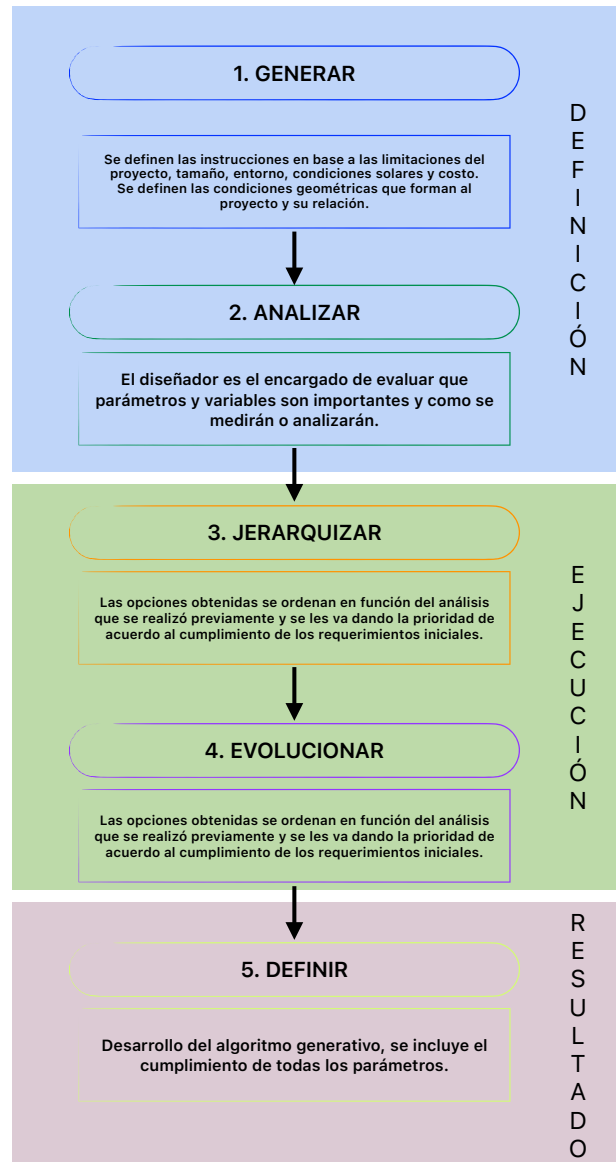


Figuras: 19 : Proceso de diseño arquitectónico utilizado en México. Fuente: Elaboración propia.

Algunas de las cualidades que nos aporta el uso del diseño generativo en la arquitectura son:

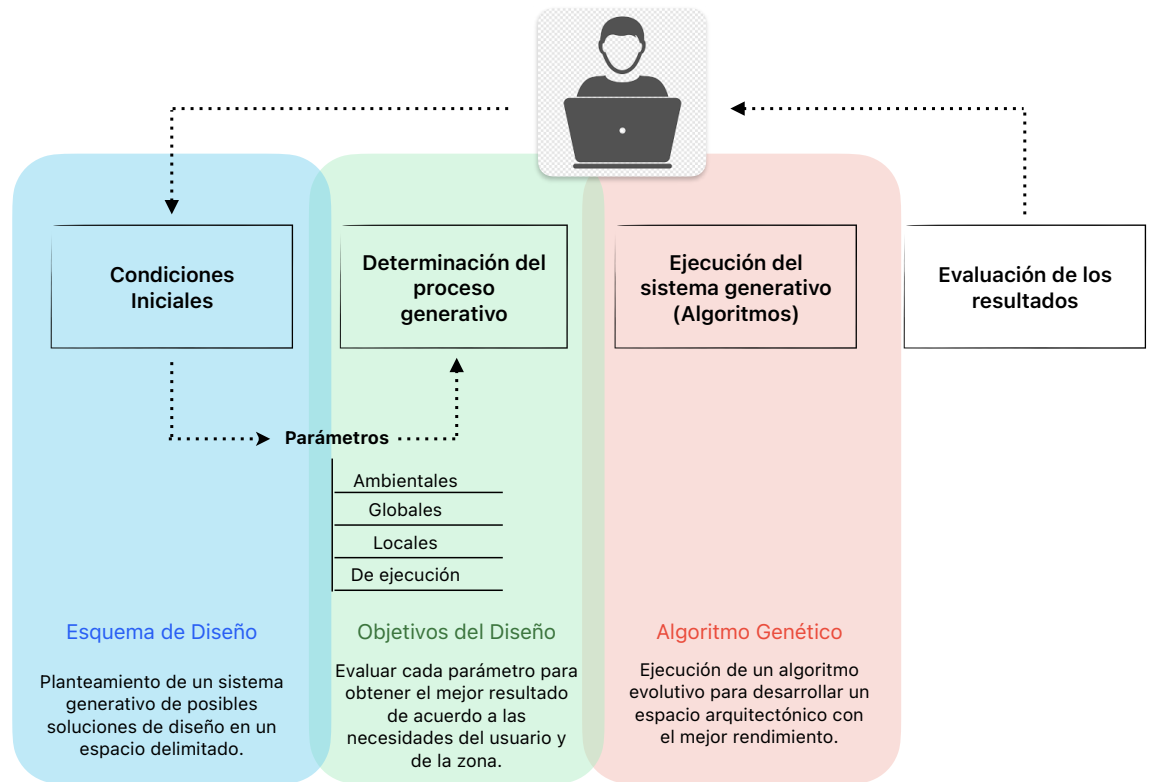
- – *Rapidez en la modificación del proyecto*: al elaborar el diseño como un sistema interrelacionado, el cambio de un parámetro afecta y actualiza todo el modelo.
- – *Gestión de información a gran velocidad*: la definición algorítmica del diseño y la ayuda de la computadora, hacen que el diseño pueda desarrollarse mediante una gran cantidad de datos de diversas fuentes.
- – *Generación y comprobación de gran cantidad de resultados*: un mismo algoritmo tiene la capacidad de generar múltiples resultados con diferentes características, en función de la información de entrada.
- – *Análisis y evaluación de la validez de esos resultados*: gracias al trabajo conjunto del diseño generativo con otros softwares (estructural, energético, ambiental, etc.) se pueden establecer parámetros que validen o no los diseños.
- – *Optimización de diseños*: mediante la aplicación de algoritmos y procesos generativos, se puede encontrar una solución optimizada para unos factores concretos.

Para desarrollar un proyecto mediante el diseño generativo se debe desarrollar el proceso por etapas, las cuales son las siguientes: (figura 20)



Figuras:20:Etapas del proceso de diseño generativo. Fuente: Elaboración propia.

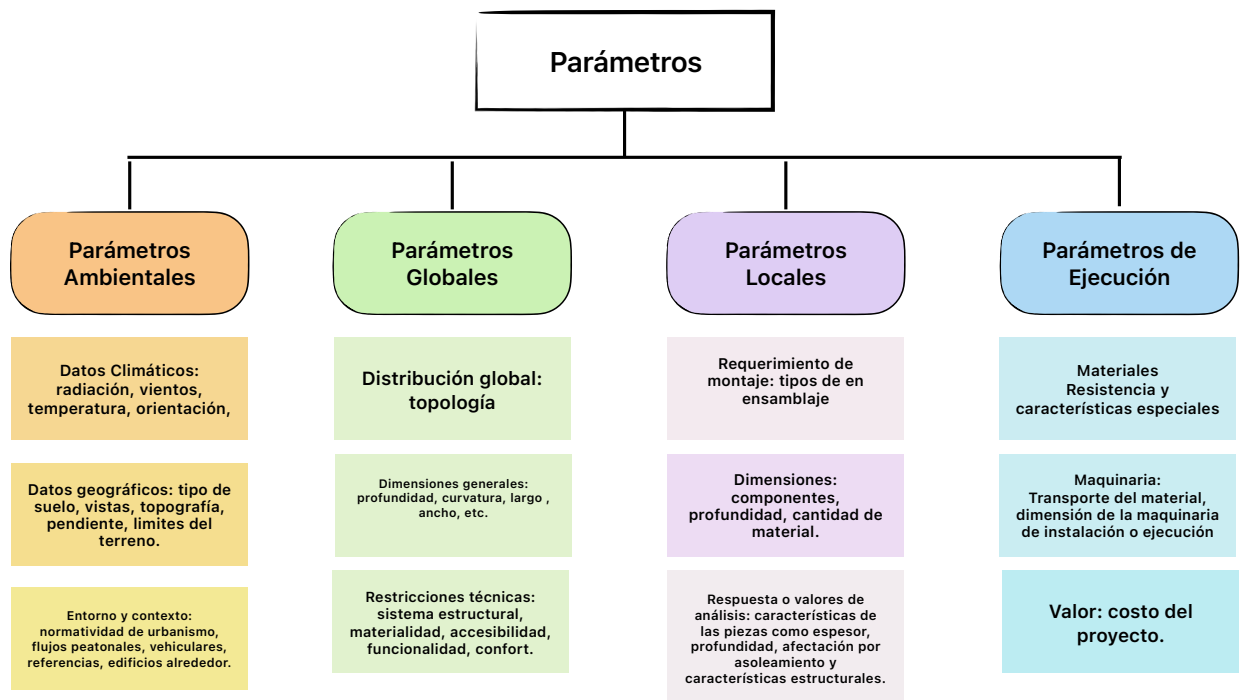
Cada etapa depende de la anterior, todo el proceso se puede repetir porque cada paso aprende de los resultados anteriores. A partir del análisis de la bibliografía sobre el diseño generativo se propone el siguiente proceso de diseño generativo, el cual será aplicado al método de diseño arquitectónico que se utiliza actualmente en México.



Figuras:21: Proceso de diseño generativo. Fuente: Elaboración propia.

Antes de mencionar la clasificación de los parámetros, es necesario mencionar la diferencia entre parámetro y variable. Los parámetros son datos o cantidades que afectan y definen como inicia el diseño, son considerados como fijos o no modificables. Esto no define que en cierto punto el diseñador pueda convertir un parámetro en variable para ampliar el espacio del diseño.

Los parámetros más utilizados en el proceso del diseño generativo se dividen en:



Figuras:21: Parámetros del diseño generativo, basado en (García, 2021.). Fuente: Elaboración propia.

El proceso generativo consiste en crear formas geométricas a partir de datos numéricos, es decir, de parámetros. El conjunto de todos estos datos forma un algoritmo, el cual será modificado con el fin de generar infinitas soluciones para las mismas condiciones iniciales.

Para ello, se necesita una herramienta que sea capaz de modificar en cualquier momento los parámetros que definen el modelo y que, al mismo tiempo y de manera inmediata, muestre los efectos de estos cambios en la representación.



2.4. Herramientas del Diseño Generativo

Actualmente existen programas que utilizan un lenguaje de programación de tipo visual (visual programming language, VPL), los elementos que compone el algoritmo se representan mediante nodos, y cada componente tiene entradas y salidas (inputs / outputs) para conectarse entre ellos e ir dando forma a la red algorítmica.

Los algoritmos son considerados una forma de inteligencia artificial definida como metaheurística. Los algoritmos heurísticos siguen un conjunto sencillo de reglas para devolver en un tiempo de cálculo mínimo una solución acertada y los más precisa posible a un problema de diseño. (Fasoulaki, 2008)

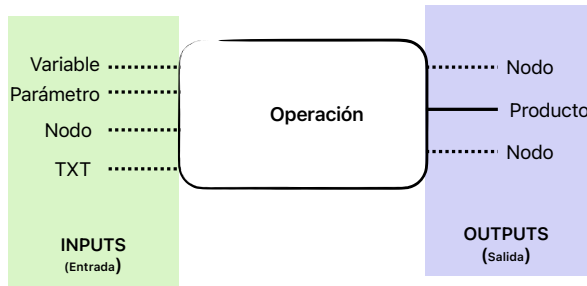
¿Qué es un algoritmo?

En matemáticas, ciencias de computacionales es una lista bien definida, ordenada y finita de operaciones que permite hallar la solución a un problema, se desarrolla a partir de un estado inicial (una entrada), continúan pasos sucesivos bien definidos que llegan a un estado final, obteniendo una solución. (Maluenda, 2022)

En la vida cotidiana se emplean algoritmos en muchas ocasiones para resolver problemas, algunos de los algoritmos más conocidos son el de Euclides que sirve para calcular el cociente de dos números o el de Gauss que sirve para resolver un sistema lineal de ecuaciones.

Ya no se está modelando en forma externa sino se articula una lógica generativa interna, la cual produce automáticamente un rango de posibilidades en donde diseñador puede elegir una solución formal apropiada para posteriormente desarrollarla. (Carrilo, 2016)

La herramienta más utilizada en el diseño generativo en el programa Rhinnoceros, aplicando su plug in Grasshooper como programador visual. Los Nodos que se utilizan en este programa se representan de la siguiente forma:



Figuras:21:Nodo grasshopper. Fuente: Elaboración propia.

Cada nodo implica una operación con la información de entrada y ejecuta un resultado que complementará al siguiente nodo del sistema.

En base al proceso del diseño generativo las estrategias más utilizadas en la arquitectura generativa son:

- **FORM-FINDING**

La forma del edificio se determina mediante un concepto basado en la naturaleza, su objetivo es lograr diseñar la forma óptima que sea adaptable al entorno donde se desarrolla, estructura funcional y sustentable. La forma es el resultado de un estado de equilibrio estático, el funcionamiento estructural es el que define la forma. Este equilibrio se encuentra a través de estructuras colgantes invertidas, o una estructura de tela bajo pretensado. La creciente demanda energética y la sustentabilidad en la arquitectura nos obliga a diseñar con otros sistemas, la forma del edificio ya no solo es una estructura es una envolvente que funciona con el edificio, como iluminación, ventilación, etc.

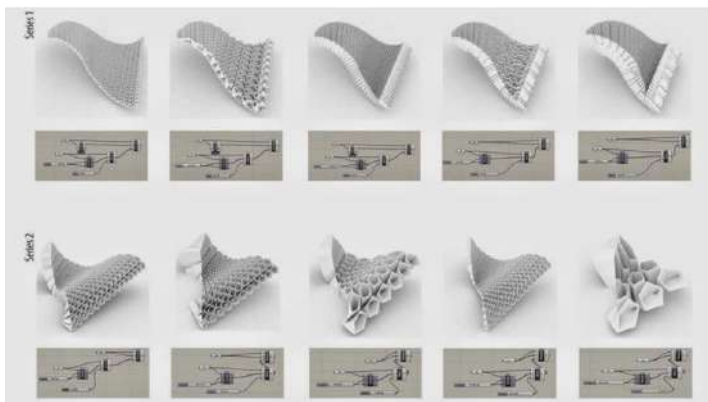


Figura 22: Proceso Form- Finding enArquitectura. (Thet, 2023)

- **FREE-FORM**

La forma se desarrolla por curvas que son independientes al funcionamiento estructural. El diseño se basa en el componente estético. Digitalmente se definen mediante polinomios conocidos como las curvas NURBS, estas curvas se definen mediante un grado y puntos de control.



Figura.23: Casa impresa en 3D, WATG arquitectos, Chattanooga, TN, Estados Unidos. (Vilar, 2016)

- **PLEGADO**

Se desarrolla mediante el concepto del origami que es el plegado de una hoja de papel para lograr figuras que representan la naturaleza. La arquitectura de formas plegadas reside en crear elementos utilizando la menor cantidad de material, desarrollado con piezas móviles y flexibles.

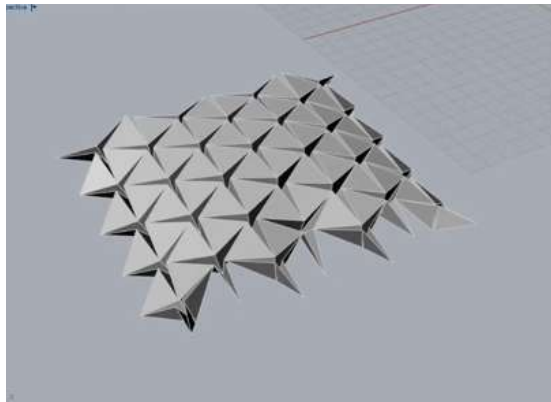


Figura 24: Ejemplo pabellón plegado. (Echeverri, 2020)

- **PANELADO**

La forma del diseño se racionaliza para que la superficie esté formada por paneles con las mismas características que al unirse den lugar a una forma más compleja, pero que al estar formada por piezas iguales hace más fácil, rápida y viable su construcción.

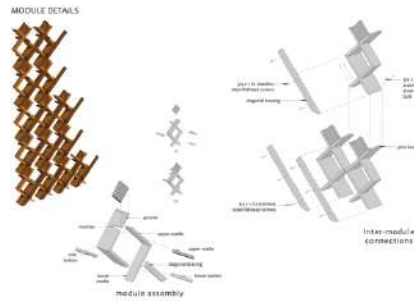


Figura 25: Pabellón modular desmontable, exhibición del Consejo de Madera de Malasia, Orlando, Florida. (Thomas, 2017)

2.4.1. Diseño Paramétrico y su relación con la Arquitectura Generativa

El diseño Paramétrico como tal es una herramienta que permite desarrollar nuevas maneras y sistemas de construcción a partir de algoritmos. Es decir, es un pensamiento algorítmico que permite la expresión de parámetros.

El diseño generativo es un sistema que se basa en el diseño paramétrico, permitiendo crear procesos de diseño innovadores; permitiendo obtener un diseño dinámico, flexible y adaptable. (Andreau, 2020)

La impresión 3D y el diseño generativo cada vez más van teniendo mayor relación ya que facilita la producción de crear productos únicos sin ser tan costosos.

El diseño será un proceso, mas no un objeto;

El diseño generativo puede ser eficaz para tareas más específicas, desde encontrar el diseño de un sombreado más óptimo hasta seleccionar la mejor ubicación para un edificio en un sitio. Es un proceso increíblemente manual que requiere que los usuarios definan todos y cada uno de los parámetros, criterios y algoritmos.



Oliver Thomas es el especialista en tecnología de diseño de BIG architects en Nueva York.

Figura 26: Computational Design. Oliver Thomas. (Thomas O. , 2024)

Se puede afirmar que el Diseño generativo favorecen y facilitan la tarea del arquitecto durante el diseño y el desarrollo del modelo. Gracias a la utilización de un software avanzado que permite un trabajo más rápido, más preciso y con un mayor control.

El diseño paramétrico y el diseño generativo son herramientas de tecnología digital que permite que mediante la computadora de desarrolle el proceso de diseño, la diferencia que tienen es simple al parametricismo se le considera como el nombre del estilo arquitectónico y a las herramientas que permite desarrollar las formas, y el diseño generativo es el sistema completo que funciona con las herramientas del diseño paramétrico.

Esta forma de diseño computacional ha revolucionado el pensamiento arquitectónico hasta tal punto que Patrik Schumacher, el arquitecto principal de Zaha Hadid Architects, fue quien utilizó el término “Parametricismo” como estilo arquitectónico. Este estilo se centra en la arquitectura libre, cada estructura y diseño tiene su propia personalidad definida por curvas y formas irregulares. (Sawantt, 2024)

2.5. Diseño Generativo en la Actualidad

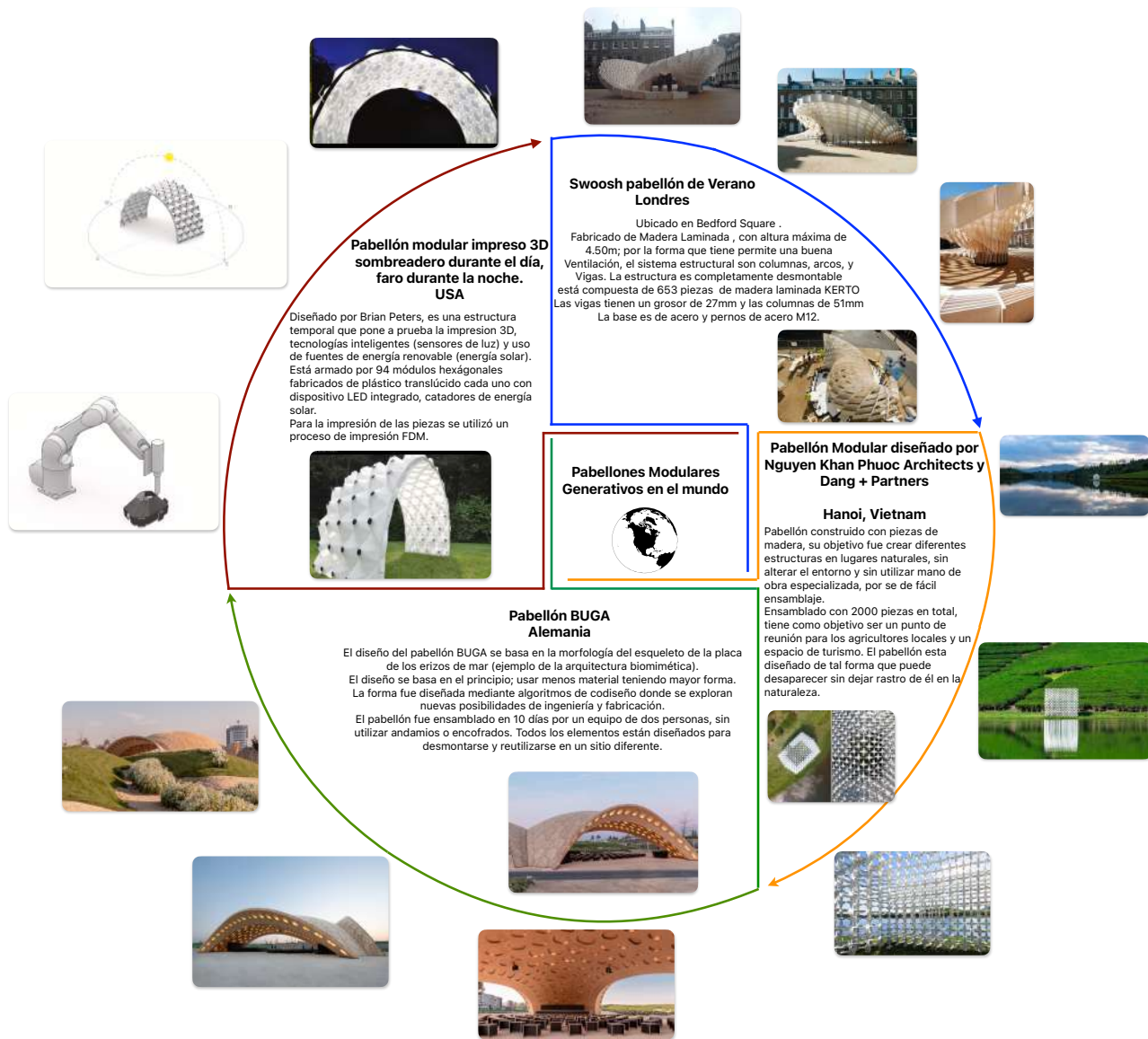


Figura 27: Pabellones Modulares Generativos en el mundo. Elaboración: Propia. Imágenes: (Stuttgart U. , 2019), (Franco T. , 2015), (Bellostes, 2008) y (Zafra P. , 2019)



2.5.1. Clasificación de Prototipos

El gran potencial que tiene el diseño generativo mediante la fabricación digital y la construcción industrial a gran escala.

La fabricación digital tiene su participación desde la etapa del diseño mediante el desarrollo del modelo (maqueta) permitiendo visualizar los componentes definitivos de la obra. Estos modelos al ser generados digitalmente y fabricados se convierten en prototipos; que aportan la visualización y comprensión tridimensional del proyecto, permitiendo visualizar las secciones de diseño, textura, luminosidad y apariencia del material.

Los prototipos rápidos son una herramienta clave para el funcionamiento del diseño generativo ya que con la utilización de herramientas tecnológicas como una impresora 3D y máquinas de corte, se obtienen prototipos en un tiempo corto, proceso que con el método tradicional de diseño no sucede, el cual requiere de más modelos, ocasionando la necesidad de tener más tiempo, se utiliza más material y el proyecto a veces se limita.

En cuanto a costo los prototipos digitales son más económicos y efectivos que las maquetas, además que los modelos impresos en 3D permite que los cambios se realicen mucho más rápido.

La tecnología digital tiene como objetivo desarrollar un trabajo colaborativo entre el diseñador y la computadora, permitiendo apreciar y analizar con mayor detalle el proyecto arquitectónico; facilitando la apreciación y explicación del proyecto.

Los prototipos se clasifican de acuerdo con su nivel de precisión:

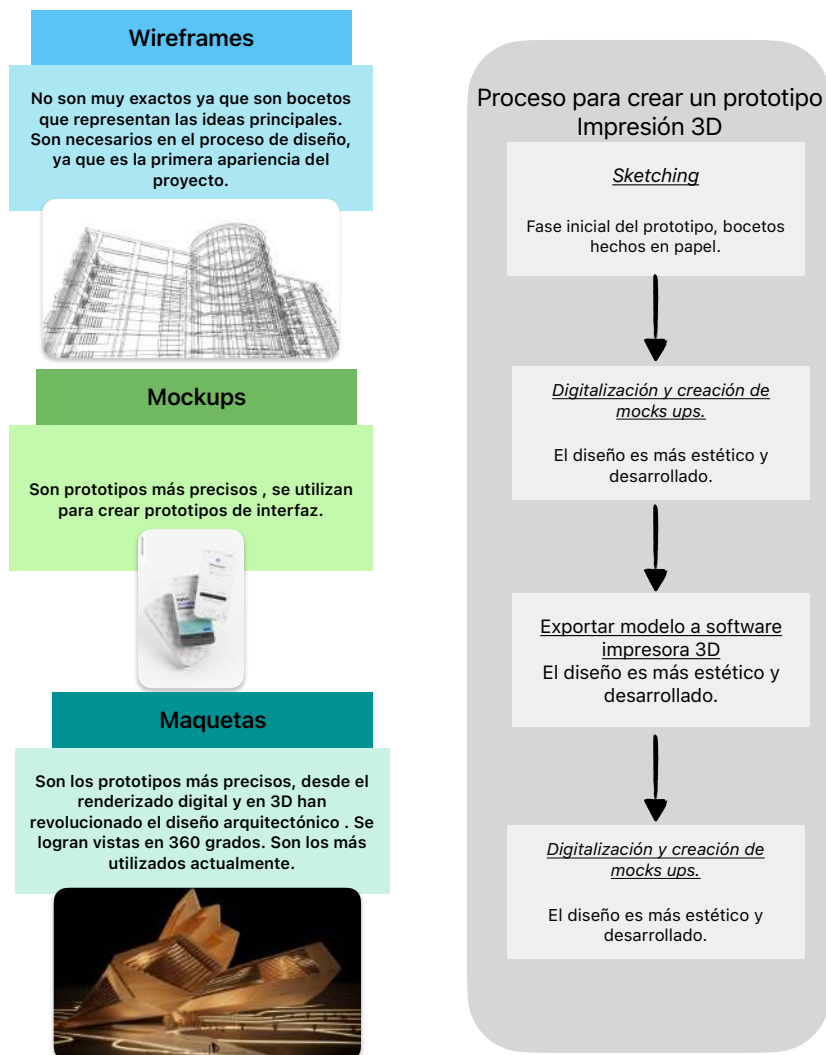


Figura 27: Clasificación de prototipos. (Elaboración: propia). Imágenes: (Arquitectura N. , 2023), (originalmockup, 2024)

Figura 28: Proceso de prototipo (elaboración propia)

Las ventajas de crear prototipos 3D mediante la utilización de impresoras o robots. Permiten aumentar el valor del producto ya que visualmente es más atractivo, expone las posibilidades del diseño y permite modificar a mayor velocidad y a mucho menor costo.

2.5.2. Procesos de Producción

La tecnología ha revolucionado el mundo y por lo tanto ha permitido que se desarrollen sistemas de representación más sofisticados en la arquitectura. La impresión 3D, cortadora láser, utilización de brazos robóticos han permitido la creación de nuevos sistemas constructivos.

Los avances tecnológicos han propiciado que las industrias desarrollen gran variedad de técnicas de robótica y de diseño de piezas con softwares como CAD (Computer-Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador), o CAM (Computer-Aided Manufacturing o Fabricación Asistida por Ordenador), CNC (Computer Numerical Control o Control Numérico Computarizado) y CATIA (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application), que han utilizado para la posterior producción de piezas, (Torres, 2016).

Este tipo de industrias han revolucionado los procesos de producción mediante la Fabricación Aditiva o Rapid Manufacturing, Rapid Prototyping, Solid Freeform Fabrication Additive Manufacturing Technologies, que consisten en la producción directa de componentes por la adición de material, para formar un objeto o pieza para uso final directo a través de la utilización de softwares. El mejor ejemplo de este tipo de fabricación es la impresión 3D.

Un ejemplo muy conocido de este tipo de construcción es el Museo Guggenheim de Bilbao. Obra del arquitecto Frank O Gehry; en su obra su despacho de diseño utilizó el software CATIA, en el cual diseñó las finas placas de titanio que dieron la forma del museo.

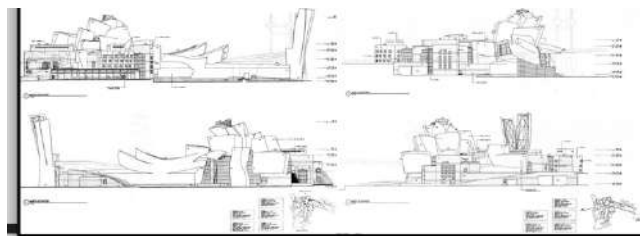


Figura 29: Museo Guggenheim de Bilbao, Fuente: (Brian, 2023)

Figura 30: Planos arquitectónicos Museo Guggenheim. Fuente: (Brian, 2023)

CAPÍTULO 3

ESPACIOS PÚBLICOS: Pabellones de exposición



3. ESPACIOS PÚBLICOS; PABELLONES DE EXPOSICIÓN

En la arquitectura el espacio públicos entrega al usuario la posibilidad de reunirse, encontrarse y participar en actividades que alientan las interacciones públicas. El espejo de la sociedad es la arquitectura, por esta razón la definición de pabellón en la arquitectura es una estructura ubicada en espacios abiertos; con dos características primordiales: ligera y efímera. (Díaz, 2023)

Pabellón en arquitectura es una estructura que se ubica en espacios abiertos, tiene como objetivo mostrar su construcción; normalmente es una experimentación estructural, conceptual, de materiales y métodos constructivos. El pabellón es la representación de evolución, adaptación y creación de una estructura arquitectónica.

3.1. Espacio público; concepto y función

3.1.1. La exposición como lenguaje visual

El lenguaje visual es aquel que percibimos a través de los ojos, la comunicación visual ha cambiado y también varía de acuerdo con cada lugar, pero en general existen siete elementos que conforman el lenguaje visual.

El color, la textura, el punto (unidad base del elemento visual), figura, forma y espacio.

El lenguaje visual es un elemento clave en la identidad arquitectónica, ya que es la herramienta que nos permite a los arquitectos y diseñadores transmitir ideas o conceptos. La arquitectura es un medio de comunicación visual. La forma, espacio, luz y materiales son los elementos fundamentales para crear una experiencia agradable al usuario que interactúa en el espacio arquitectónico. (Alba, 2023)

Los arquitectos utilizan el diseño para contar historias, mostrar identidad y representar conceptos, los pabellones es un espacio creativo en el que la fluidez y la innovación estructural son más orgánicas y dinámicas.

El lenguaje visual arquitectónica genera emociones, los tipos de color, texturas influyen en el estado de ánimo del usuario, la forma en la que entra la luz o se ventila el espacio define la experiencia del lugar.



El lenguaje visual mediante la arquitectura se puede aprovechar mediante:

- **Investigación y conceptualización:** el diseño debe adecuarse al entorno donde se desarrolla.
- **Identidad:** el lenguaje visual arquitectónico va en relación con la identidad y representa sus valores.
- **Innovación y experimentación:** la utilización de tecnologías permite la experimentación de materiales y sistemas constructivos, abriendo posibilidades en el lenguaje visual.

Para que el lenguaje visual sea innovador y efectivo se requiere de un trabajo multidisciplinario para poder fusionar el funcionamiento con el diseño, teniendo originalidad e impacto.

3.1.2. Pabellones de exposiciones

El pabellón en arquitectura se define como una representación de la necesidad de experimentar y aterrizar lo abstracto en el diseño arquitectónico. El Pabellón surge de Mies Van de Rohe como un proceso de experimentación, él decidió dejar a un lado la suntuosidad de la arquitectura y se enfocó en desarrollar una estructura sencilla con decoro en la selección de materiales. En este caso el mármol, vidrio y acero son los protagonistas del espacio abierto, su concepto es la ligereza.

El pabellón en su momento fue desarmado y retirado tras la finalización de la exposición, pero en 1986 se inició su reconstrucción mostrando que un diseño efímero que da como resultado una obra permanente. (Díaz G. , 2023)

Actualmente el Pabellón Mies Van Der Rohe continúa siendo imagen del movimiento modernista.



Figura 31: El pabellón alemán / Mies Van der Rohe. Fuente: (Zuleta, 2011)

Otro pabellón muy importante es el pabellón Brick – Topia, construido en el año 2013 en el Festival Internacional de Arquitectura Eme3 con sede en Barcelona. Consiste en una estructura que desafía la resistencia del ladrillo y su utilización como método de construcción. Demostró que al utilizar herramientas digitales los materiales pueden mostrar más capacidad de resistencia, permite a los arquitectos hacer diseños que revolucionen la arquitectura.

El pabellón Brick- topia va más allá de la ya conocida rigidez del ladrillo y exploró la plasticidad que da una bóveda tabicada. Dio como resultado una estructura orgánica donde los vanos ovalados y los planos cóncavos desarrollaron un espacio único de ladrillo.

Cada Diseño es el reflejo de la exploración de una visión propia del arquitecto a cargo, desde la estructura hasta la forma y el diseño arquitectónico.



Figura 31y 32: Pabellón Brick – Topia. Fuente: (Lózar, 2014)



3.1.3. Arquitectura funciona bajo necesidades o tendencias

La arquitectura a lo largo de la historia ha evolucionado buscando adecuarse a las necesidades del mundo actual, aunque algunos autores difieren en el término necesidad como el siguiente: El diseñador no puede decidir lo que es realmente necesitado ni preguntando ni observando desde afuera, porque el concepto de necesidad no está bien definido. (Uribe, 2019)

Se da la propuesta de reemplazar la idea de necesidad por el concepto de tendencia que se adecua a lo que los usuarios buscan realizar. Se enfoca en la acción de buscar satisfacer la necesidad.

Una tendencia funciona bajo la siguiente afirmación; formulamos y desarrollamos las relaciones que comprende dicha acción o evento con el propósito de encontrar una relación geométrica o numérica que se pueda trasladar a un espacio tangible.

Bajo esta relación el diseñador cuida del medio ambiente, a través del diseño que no contenga tendencias que entren en conflicto y que aseguren al usuario la posibilidad de satisfacer sus necesidades. Entonces la arquitectura mediante el diseño computacional, estudio de tendencias, relaciones geométricas, formulación de variables cuantificables y depuración de sistemas generadores se crean obras que satisfagan las necesidades del usuario y del medio ambiente.

3.1.4. Contextualismo

En la arquitectura el contextualismo trata de desarrollar formas en el diseño, inspiradas en la naturaleza o entorno que lo rodea, manteniendo su identidad. De este modo la arquitectura se entrelaza dentro del tejido urbano. El contextualismo une la cultura, la historia del lugar y el tiempo.

Las características del paisaje influyen en la forma y función del proyecto arquitectónico, ya que se busca que se mezcle con el paisaje. Las áreas de conservación urbana generalmente limitan la construcción de proyectos nuevos, con el fin de cuidar el ambiente. Los proyectos

que se diseñan bajo el contextualismo tienen una normativa controlada que permite conservar el contexto local.

Una arquitectura contextual se puede utilizar para crear nuevas tendencias y estilos siendo parte de una estrategia sustentable. La arquitectura cuando se utiliza para bien común inspira un impulso de crecimiento, progreso y cuidado del medio ambiente. Muchos diseñadores pueden resistirse al cambio, pero cuando se visualizan los beneficios, se empiezan a visualizar cambios.

El pabellón Wavescape (figura 33) tiene dos espacios de exposición, representa la planta del edificio con el concepto de dos moléculas de agua. Una cubierta flotante envuelve al edificio, dando una visión de transparencia y cambio. La envolvente tiene un movimiento vertical ya que hace el efecto de ser la marea y las olas del mar.

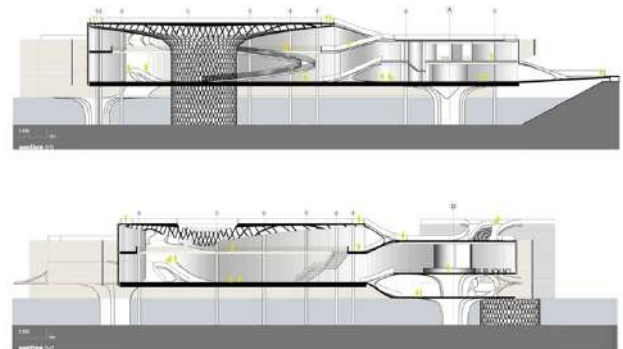


Figura 33y 34: Pabellón Wavescape. Fuente: (aqso, 2023)

Otro ejemplo del contextualismo es el Bamboo Pavilion (figura 35) representado con la forma de una serpiente; diseñado por LIN Architecture, busca impulsar la construcción ecológica, el funcionamiento sustentable. El objetivo de este pabellón es crear un espacio agradable para los agricultores de la zona se crea una sensación de intimidad y conexión.



Figura 35y 36: Pabellón Bamboo Pavilion. Fuente: (Ranjit, 2021)

3.2. Estructuras Generativas Materiales, fabricación y diseño digital

En la actualidad el diseño estructural utiliza procesos convencionales que en algunas ocasiones restringe la flexibilidad del diseño, provocando que algunos elementos estructurales sean ineficientes o en algunos casos que se utilice más material del que se necesitaba por cumplir con los requerimientos, produciendo sistemas constructivos más costosos y con mayor impacto ambiental. Actualmente la digitalización en el diseño permite construir estructuras con formas geométricas más complejas con ayuda de la maquinaria de la fabricación aditiva, como por ejemplo la impresión 3D de concreto.

La utilización del diseño generativo en la estructura de una obra permite tener un análisis preciso de las cargas que requiere soportar la obra, abriendo camino a la utilización de materiales innovadores y de menor impacto ambiental. (Díaz G. e., 2021)

El uso del diseño generativo en el análisis permite cumplir con las mismas condiciones requeridas actuales, pero con la utilización de menor cantidad de material, crea simulaciones de funcionamiento, considerando desde un inicio los parámetros como la exposición al sol de la estructura, permite la utilización de maquinaria específica para su armado por lo que el desarrollo de la obra es más rápido.

3.2.1. Arquitectura Biomimética

Actualmente ya existen varias disciplinas que tratan sobre la imitación del funcionamiento de los seres vivos para optimizar el consumo de materiales y energías.



La Arquitectura Biomimética es nombre que se le da al estilo arquitectónico inspirado en la biónica, que, por definición, es la disciplina transversal que combina la biología y la tecnología imitando los principios básicos de los esquemas estructurales anatómicos presentes en los seres vivos o incluso los fenómenos naturales para transformarlos en soluciones que satisfagan las necesidades humanas. (Construcía, 2018)

El objetivo de la biomimética es conocer las diversas estructuras orgánicas de los seres vivos, estudiar su funcionamiento como una forma de actuar en el diseño técnico, con el fin de innovar modelos y conceptos en diferentes campos como sistemas mecánicos, estructuras de construcción y procesos tecnológicos.

Muchos de los problemas que enfrentamos en la Arquitectura ya han sido resueltos en la naturaleza. Los seres vivos han enfrentado y han ido evolucionado según la teoría de la “selección natural” desde hace millones de años teniendo su respuesta a la naturaleza. Son modelos ideales que podemos copiar de ellos. Esto no se trata de una imitación puramente formal. Las formas de la naturaleza siempre tienen un por qué detrás, y este por qué es lo que debemos aprender de ellos.

Un tema muy importante de la biomimética es la búsqueda de la optimización estructural este método se aplica a la estructura en general del edificio para conseguir el objetivo predeterminado bajo las condiciones de restricción. Teniendo en cuenta las limitaciones de los materiales y las restricciones generales en el diseño estructural, se trata de maximizar (altura de un rascacielos, luces entre pilar, espacialidad o utilidad) o minimizar (el peso propio, la inversión de la estructura), mejorando así la efectividad y la racionalidad de la estructura del edificio.

Las variables de diseño, las funciones objetivas y las restricciones son los tres elementos básicos de un trabajo de diseño de optimización estructural. Lo primero es determinar los parámetros de diseño básicos, que son similares al rendimiento de la estructura, para modelar matemáticamente la estructura. Algunos de estos parámetros se pueden ajustar y cambiar de acuerdo con los requisitos de diseño y deben determinarse durante el proceso de optimización. (Lozano, 2010)



Al generar espacios optimizados, se mejora la arquitectura ya que habrá una reducción de residuos, se obtiene mayor calidad en la obra, con un mantenimiento más sencillo. Se realiza un estudio energético permitiendo el aprovechamiento de los recursos naturales y brindando un espacio más confortable al usuario.

En la naturaleza, los seres que han sobrevivido hasta hoy en día tienen una forma adaptada a las condiciones del entorno. Esta adaptación significa menos gasto de material y de energía. Todas las especies de la naturaleza no gasta más de lo necesario. Ahorro del material y ahorro de la energía, estos son los dos conceptos básicos de la arquitectura Biométrica.

3.2.2. Estructura Modular Generativa en pabellones México

La arquitectura en México ha tenido una gran evolución y mezcla a lo largo de la historia. Empezó desde el México prehispánico, continuó el estilo colonial hasta la actualidad el estilo moderno. El mundo ha reconocido la arquitectura mexicana dándole a varias ciudades el título de patrimonio de la humanidad.

La belleza de las ciudades ha merecido a México ser el país con más reconocimientos de la UNESCO en el continente americano. (Arquitectura S. , 2019)

Como menciona Octavio Paz, la arquitectura es huella insobornable de la historia.

A pesar de la gran evolución que ha tenido la arquitectura en México, el desarrollo del diseño generativo aplicado en el diseño arquitectónico es muy limitado, México por su identidad arquitectónica tiene un gran potencial de crear espacios innovadores, con un equilibrio entre funcionalidad contemporánea mediante la estética de la tradición así mismo pensando en la conexión de la naturaleza con la sustentabilidad.

La función de los pabellones en arquitectura es a una escala menor mostrar nuevas técnicas contractivas que más adelante se espera que se practiquen en toda la arquitectura.

Actualmente los pabellones con sistemas generativos que existen en México son los siguientes:

Pabellones en México



Figura 37: Pabellones Modulares en México. Fuente: elaboración propia. Imágenes: (PPAA, 2023), (Rojkind, 2022), (CEDIM, 2023) y (Mota-Engil, 2022).



3.3. Industrialización en la construcción

La digitalización de la actualidad afecta todas las áreas y la construcción no es la excepción; la construcción industrializada consiste en mecanizar lo máximo posible los procesos de diseño arquitectónico, mantenimiento y construcción. El objetivo es optimizar el trabajo y desarrollar productos de calidad y sustentables.

Actualmente el desarrollo de metodologías industrializadas son muy utilizadas ya que permite montar la obra con mayor rapidez y se genera una estandarización de los sistemas que permiten que las construcciones sean más rentables.

Las ventajas de la construcción industrializada son: (Kömmerling, 2023)

- El proceso es multidisciplinario
- Empleo de últimas herramientas de diseño: metodología BIM, software como Rhinoceros, Revit, etc.
- La fabricación se hace con robots y con humanos.
- Entorno de trabajo más controlado: la obra es más segura.
- La sustentabilidad se desarrolla a mayor nivel.
- Los tiempos de diseño y ejecución se reducen.
- Se reduce el costo: desde el inicio todos los imprevistos se controlan lo que permite un mayor control de la obra reduciendo los problemas que pasan en la obra.
- Mejora e transporte y logística: los materiales de construcción se centralizan en la nave de fabricación.

Las diferencias que tiene la construcción industrializada vs. la tradicional principalmente son los procesos constructivos; en la construcción industrializada se innova y se busca reducción de material en la fabricación y montaje. Las posibilidades del diseño se amplían ya que permite crear formas orgánicas, un diseño personalizado, con mayor calidad, construidos en menor tiempo a un menor costo y sustentables.



Los tipos de construcción que existen actualmente se dividen dos categorías que son:

Por materiales estructural empleados: concreto, madera y acero.

Elementos industrializados: elementos industrializados unidimensionales (perfiles extruidos de acero), industrialización de elementos bidimensionales (muros paneles) y módulos 3D industrializados.

3.3.1. Estructuras prefabricadas

El ejemplo más emblemático de la arquitectura prefabricada es el pabellón de madera BUGA, diseñada por los arquitectos ICD / ITKE Universidad de Stuttgart en el año 2019. La manufactura realizada por la empresa Hertalan; en Alemania. Es un pabellón que funciona como sala de conciertos, su forma es un caparazón modulado en base a la forma de un esqueleto de los erizos de mar.

Es una obra arquitectónica con una conceptualización de la biomimética, donde se busca utilizar menos material y tener como resultado una forma atractiva, para este ahorro de material cada uno de los módulos son dos placas delgadas de madera que se colocan sobre un anillo de vigas de borde, creando cajas de madera huecas. Este proyecto se desarrolló en 13 meses y fue ensamblado mediante brazos robóticos, cuenta con 376 módulos.

En este proyecto se utilizó la metodología BIM y el diseño generativo donde se crearon algoritmos para desarrollar una construcción virtual, el proceso computacional permite cuidar cada detalle de los elementos constructivos.

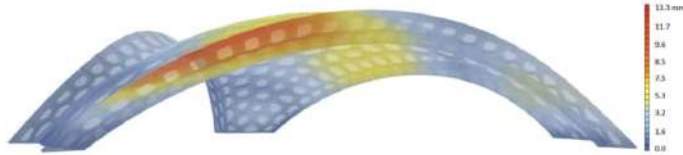


Figura 38 y 39: Pabellón BUGA. Fuente: (Eligemadera, 2020)

3.3.2. Montaje

Todo el proceso desde la fabricación de las piezas fue totalmente automatizado, el tiempo de montaje por módulo fue de 8 minutos y el lijado para las uniones de 20 a 40 min. Fue ensamblado en 10 días por dos trabajadores. En la superficie se colocó una capa de lámina EPDM para darle impermeabilización. (Stuttgart, 2019)

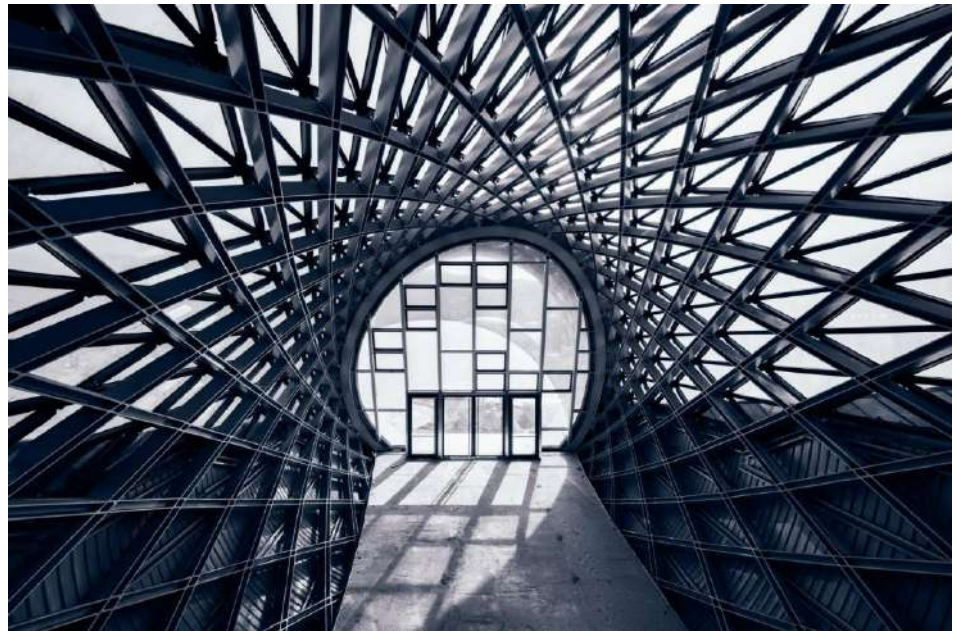
Cada uno de los elementos está diseñado para desmontarse y reutilizarse, cada uno de los módulos pesa sólo 38kg/m². El pabellón BUGA representa una obra arquitectónica fabricada con madera y que es eficiente, ecológica, económica y con identidad. Logrando una arquitectura más eficiente al mezclar la innovación digital con la investigación científica.



Figura 40 y 41: Pabellón BUGA. Fuente: (Eligemadera, 2020)

CAPÍTULO 4

Impresión 3D en concreto y su relación con el diseño generativo.



4. IMPRESIÓN 3D EN CONCRETO Y SU RELACIÓN CON EL DISEÑO GENERATIVO

4.1. Concepto

El concreto armado es y seguirá siendo el material más utilizado en la industria de la construcción, debido a las ventajas que tiene como es rentabilidad, adaptabilidad de forma y resistencia. En el área de la construcción las estructuras de concreto en México se han desarrollado de manera tradicional (utilizando encofrado, armado, curado, etc.) de manera conservadora sin alguna forma de innovación. (DOMAT, 2023)

En la actualidad existe mucha información sobre el mejoramiento del concreto, la utilización de fibras, nanomateriales, aceleradores de fraguado y superplastificantes. Han mostrado mejoras en las propiedades y la calidad del concreto.

La fabricación Aditiva, concretamente la impresión 3D de concreto en la industria de la construcción ya existen algunas empresas como Contour Crafting, Concrete Printing y la empresa líder APIS COR.



Figura 42: Impresora 3D de concreto. Fuente: (Apiscor, 2024)

Por lo tanto se trata de un sistema novedoso que trae muchas ventajas en la construcción como:

- *Libertad de Diseño:* diseño de formas orgánicas que permitan el desarrollo de sistemas estructurales innovadores.
- *Automatización:* la obra se ejecuta con mayor precisión, menor coste de mano de obra (se requiere menos volumen de trabajadores, pero se requiere mano de obra calificada)
- *Sustentabilidad:* reducción de residuos, se utilizan materiales innovadores y eficientes. Se ahorra hasta un 70%. Se genera menos residuo ya que se imprime sólo lo necesario, en cuanto a la plomería y electricidad ya son modelos prefabricados.
(Martín, 2017)
- *Menos refuerzo,* se requiere de menor cantidad de acero.
- *Diseño eficiente;* se reduce la cantidad de material requerida ya que en el diseño se aplica topología optimizada que permite soluciones de diseño.
- Permite utilizar nuevos materiales.
- *Velocidad:* la obra se ejecuta en menor tiempo

En la impresión 3D de concreto, la mezcla que se utiliza es la siguiente: (figura 43)



Figura 43: Mezcla concreto impresión 3D de concreto. Basado en (Muñoz, 2023) Fuente: elaboración propia

4.2. Tipos de Impresión y Funcionamiento

En varios países del mundo se han realizado investigaciones con el objetivo de desarrollar proyectos de mayor escala y funcionales, mediante la impresión 3D

La impresión 3D de concreto es una técnica constructiva que no está muy difundida, pero lo que se ha construido muestra que trae grandes beneficios como el ahorro de un 30 a 60% en los residuos, disminución de tiempo de producción de un 70% y reducción de costos de mano de obra de un 80%. (Valdés, 2022)

El principal representante de la impresión 3D es la empresa Apis Cor. (figura 44)



Figura 44: Impresora 3D de concreto. Fuente: (Apiscor, 2024)

Para la creación de objetos físicos, se desarrolla a partir de un archivo CAD (computer- aided design) siendo una representación geométrica, A partir de este archivo se exporta a un software de tipo CAM (computer- aided manufacturing) el cual divide al modelo en capas individuales, con el objetivo de generar las instrucciones necesarias para la fabricación de cada una de las capas. (Integral, 2019)

A continuación, se presentan obras fabricadas mediante la impresión 3D de concreto:



Figura 45 y 46: Puente impresión 3D en el parque Catilla- La mancha en Alcobendas, Madrid. (Alcobendas, 2016)

Primer puente peatonal impreso en 3D (2016), es una estructura de concreto micro-reforzado, con alta resistencia ya que no tiene soportes internos, Desarrollado por la empresa Acciona.

En China se inauguró el edificio más alto impreso en 3D, la empresa Winsun Decoration Design Engineering Co; después de construir 10 casa en menos de 24 horas, finaliza sus obras más recientes un edificio de cinco pisos y una mansión de 1100 m².



Figura 47, 48 y 49: Mansión, Edificio de departamentos, Interior del edificio. Parque Industrial Suzhou. Jiangsu. (Stott, 2016)

La mezcla con la que se construyeron estas obras era a base de fibra de vidrio, acero, cemento, desechos de construcción y aditivos de endurecimiento.

4.3. Identificación de problemas y ventajas en el diseño generativo.

Claramente el calentamiento global va en aumento por lo que debemos considerar cambiar el enfoque en el proceso de diseño de edificios. Por esta razón la tecnología del diseño generativo sigue avanzando mediante investigación, empresas emergentes o innovación.

Diseñadores y arquitectos con gran experiencia reconocen el impacto que tiene el diseño generativo ya que reduce costos, material, el desarrollo y el impacto ambiental es menor.

Y si unimos el diseño generativo con la fabricación aditiva, impresión 3D se abre un nuevo panorama en el diseño arquitectónico.

Tal vez la desventaja de este diseño es el tiempo que se lleva en el diseño ya que el análisis requiere de parámetros precisos para que el algoritmo se desarrolle de manera correcta.

Mientras la tecnología continúe su avance, diseñadores e ingenieros tendrán la oportunidad de expandir sus horizontes profesionales y su creatividad.

4.4. Entrevista a expertos

Objetivo: Realizar entrevista a expertos de otros países, específicamente lugares donde el diseño generativo ya es aplicado en obras de gran impacto.

ENTREVISTA A EXPERTOS. (sondeo) como se válida?
Tener resultado inmediato

Como parte de elaboración de la tesis para obtener el grado de Doctora en Diseño titulada Diseño Generativo y fabricación Aditiva en países con economía emergente. Se realiza la siguiente entrevista a expertos en el tema, con el objetivo de plantear la hipótesis de la investigación.

1. ¿Qué tan frecuentemente utiliza el diseño generativo en tu vida profesional?

- a). 1 vez a la semana b). 1 vez al mes. c). 1 al año. d). Nunca (motivo)
- por desconocimiento
 - Porque es muy costoso
 - Falta de interés
 - Falta de tiempo
 - Otro (especifica)

2. ¿Qué herramientas utilizas?(puedes seleccionar más de 1)

- a). Revit b). Rhinoceros. c). Fusion 360. d). Auto CAD e). Sketchup
- 

3. ¿Qué tan útil ha sido esta herramienta?

- a) Automatización del proceso de diseño
b) Capacidad de simulación y control de parámetros
c) Permite visualización real del modelo arquitectónico
d) Flexibilidad en el diseño
e) Elaboración rápida de prototipos
f) Interfaz amigable con el usuario (intuitiva)
g) Minimización de errores humanos

4. ¿Qué ventajas tiene utilizar el diseño generativo?

- a) Velocidad al diseñar
b) Optimización de recursos
c) Recursos económicos, de tiempo, humanos, equipo y herramienta
d) Personalización
e) Ahorros de tiempo y costo
f) Diseño innovador disruptivo
g) Interdisciplinaria

5. Jerarquice del 1 al 5 aquellas áreas que considere con mayor impacto en el diseño generativo, siendo 1 la que más importancia tiene.

- a) Biomimética
b) Contextualismo
c) Fabricación Aditiva
d) Sustentabilidad
e) Accesibilidad



Figura 50 y 51: Entrevista expertos. Fuente: elaboración propia.

Entrevista 1: Rodrigo Carbajal / **Barcelona, España**

Arquitecto, Diseñador, Investigador, actualmente esta centrado en aplicar inteligencia artificial en diferentes procesos en tres sectores: Construcción, Transporte, Moda.

Entrevista 2: Mario Pliego / **Chicago, EUA**

Arquitecto, creador de Primitivo arquitectura, despacho de diseño en busca de la innovación en la arquitectura.

En el caso de los dos expertos ambos utilizan muy frecuentemente el diseño generativo en su vida profesional, utilizan para sus proyectos los softwares Rhinnoceros, Revit y Sketchup.

Afirman que el diseño generativo permite:



- Automatización del proceso de diseño
- Visualización real de modelos arquitectónicos
- Capacidad de simulación y control de parámetros
- Flexibilidad en el diseño
- Elaboración rápida de prototipos
- Interfaz amigable con el usuario (intuitiva)
- Minimización de errores humanos

Y las principales ventajas del diseño generativo son :

- Velocidad al diseñar
- Optimización de recursos
- Personalización
- Ahorro de tiempo y costo
- Diseño innovador disruptivo
- Interdisciplinaria

En cuanto a las áreas con mayor impacto en el diseño generativo mencionan lo siguiente:

1. Biomimética
2. Sustentabilidad
3. Accesibilidad
4. Fabricación Aditiva
5. Contextualismo

A partir de los resultados se concluye de manera favorable los elementos de la metodología planteada en la investigación y se confirman las ventajas que tiene el diseño generativo en la arquitectura, cabe mencionar que las áreas de impacto mencionaron que pueden cambiar de orden de acuerdo al proyecto arquitectónico.



4.5. Propuesta Metodológica de Diseño Generativo y fabricación aditiva

En el diseño generativo las condiciones iniciales son los aspectos más relevantes ya que definen el proyecto, son conceptuales, superficies funcionales, magnitudes o características de la forma, entre otras. Es necesario que estas condiciones establezcan relaciones entre sí para poder desarrollar el modelo generativo.

A partir de este análisis se presenta el proceso metodológico planteado para el desarrollo de proyectos arquitectónicos mediante la utilización del diseño generativo en México; país con economía emergente.

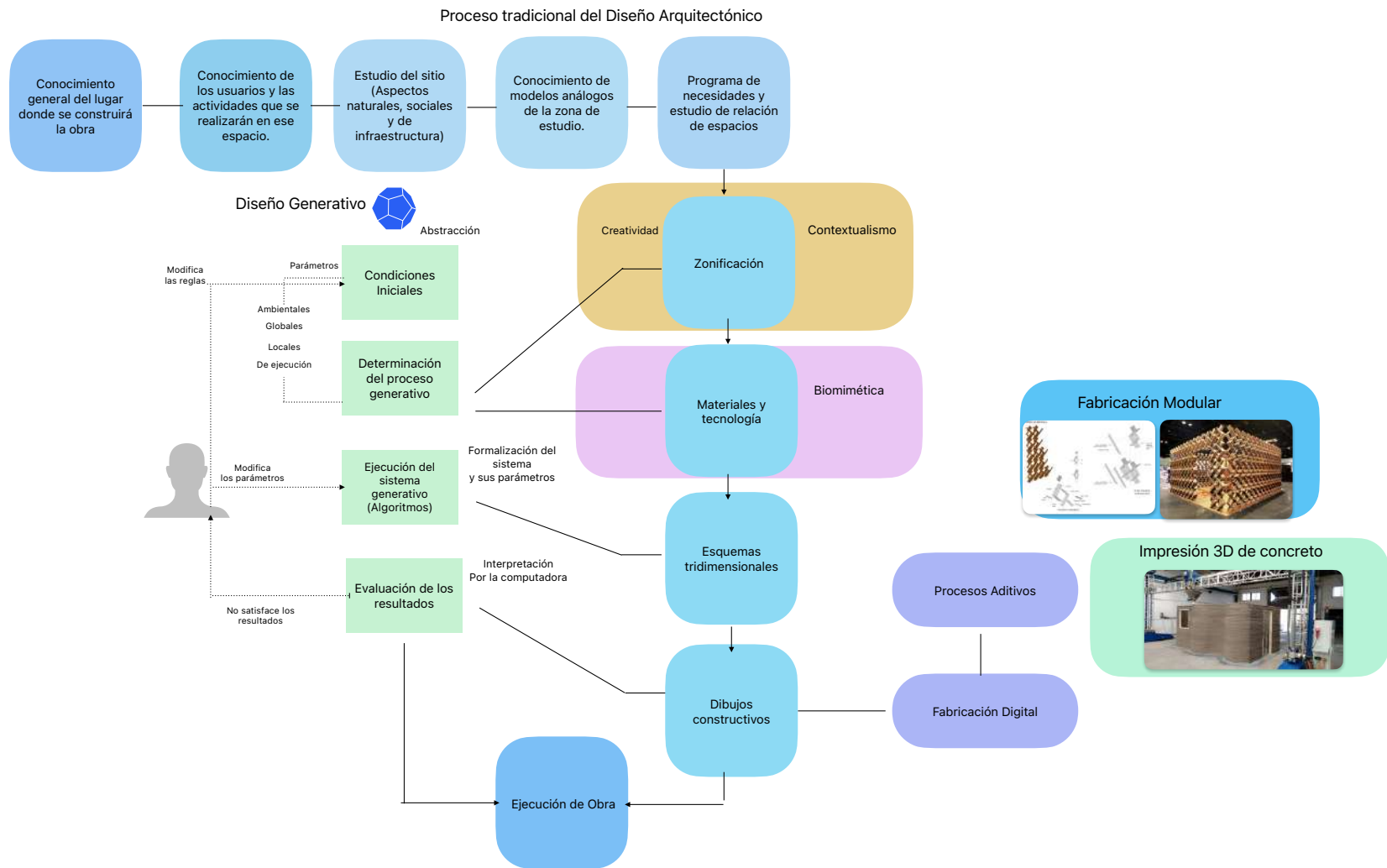
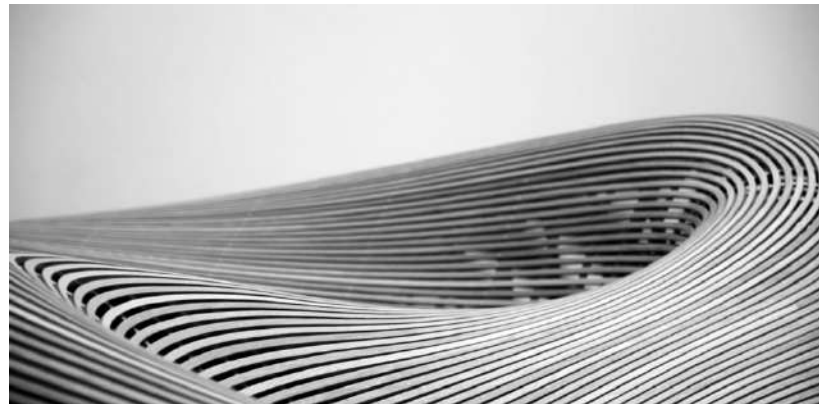


Figura 52: Metodología Diseño generativo. Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 5

Aplicación del diseño generativo (caso de estudio)



5. APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO (CASO DE ESTUDIO)

Una vez mencionado e ilustrado el método de diseño propuesto, se presenta el trabajo realizado para la aplicación de la metodología planteada.

En ese caso se realizaron tres pruebas en las que se muestra el correcto funcionamiento del diseño generativo, así como la comprobación visual del mismo. Para el diseño de todos los casos se utilizó el software Rhinoceros con el plugin Grasshopper.



En el caso de la impresión 3D se utilizó la impresora Photon M3 max 7k ANYCUBIC la cual funciona con el tipo de impresión por estereolitografía – SLA. Este tipo de impresión utiliza luz láser UV para fotopolimerizar selectivamente la resina líquida curable, creando un modelo sólido. Esta técnica es muy precisa y tiene un muy buen acabado final. Sus principales ventajas son la precisión alta y la calidad de la superficie lisa. (BCND3D, 2021)

ANYCUBIC

DATOS TÉCNICOS

Sistema: ANYCUBIC Photon Mono M3 Max
Operación: Pantalla táctil de 3,5 pulgadas
Software: Photon Workshop
Conectividad: USB-A 2.0
Fuente de luz: Matriz paralela (luces LED x 84)
Relación de contraste: 450:1
Precisión del eje Z: 10 micras
Resolución XY: 46 micras
Resolución LCD: 6480x3600px (7k)
Velocidad de impresión: ≤ 6 cm/h
Densidad poder: 3,500 - 4,000 μw/cm²
Tamaño de la impresora: 596*400*408 mm
Volumen de construcción: 30,0 x 29,8 x 16,4 cm
Material: resina UV de 405 nm
Peso neto: 26 kg



Figura 53: Ficha técnica de la impresora 3D. (market, 2022)

Figura 54: Impresora 3D ANYCUBIC. Facultad de Ciencias UAEMex. (Fuente: propia)

5.1. Caso 1. Optimización de esfera.

En este caso a partir de una esfera, se dividió a la mitad para crear un domo. El objetivo de este estudio es mostrar el alcance de la optimización topológica que tiene el diseño generativo.

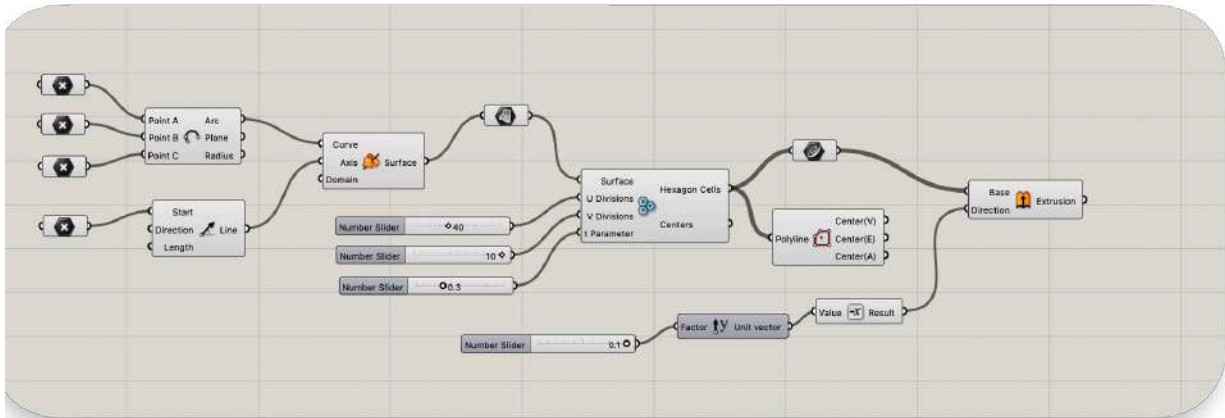


Figura 55: Algoritmo de la esfera, realizado en grasshopper. (fuente: propia)

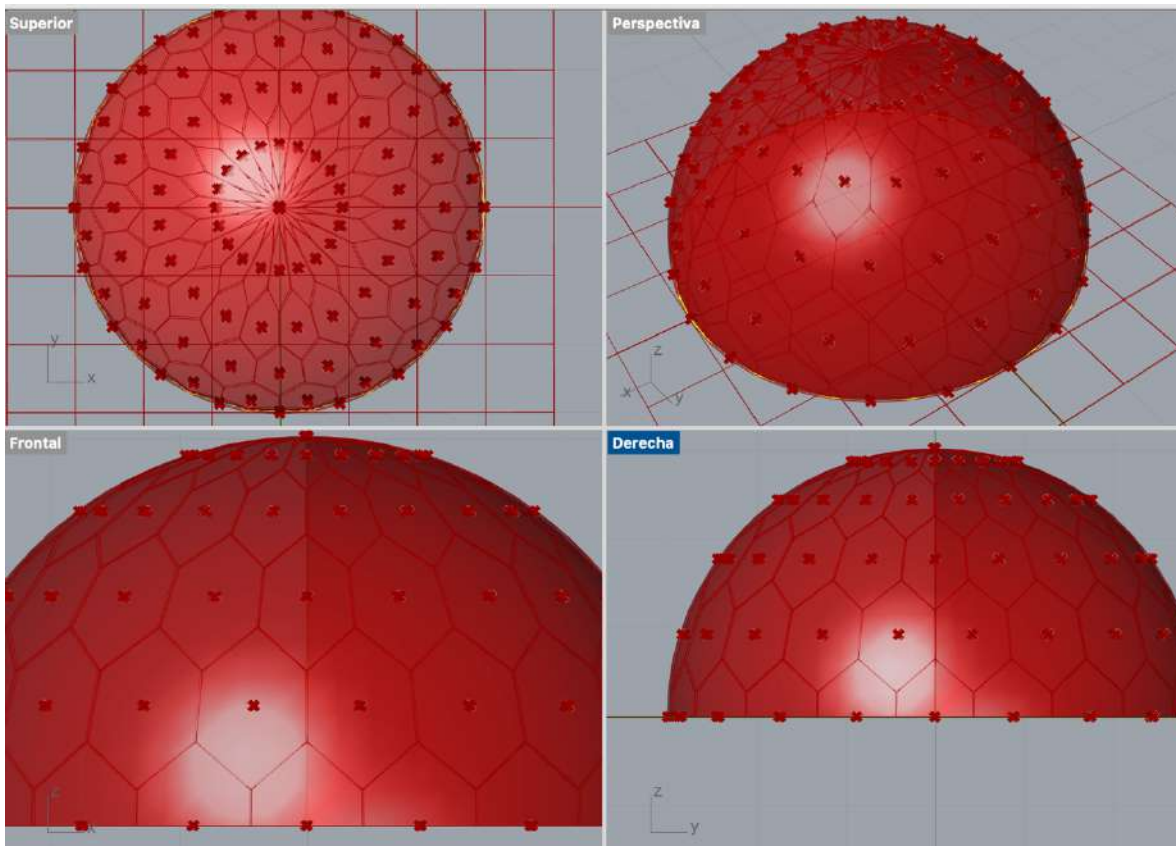


Figura.56 : Etapas de Modulación de la esfera (fuente: propia)

De acuerdo con el algoritmo desarrollado se adecuaron los parámetros de tal manera que los módulos fueran lo más regulares posibles, con el objetivo de que se facilitara el montaje. Se creó una estructura para la identificación de las uniones y armado de las piezas.

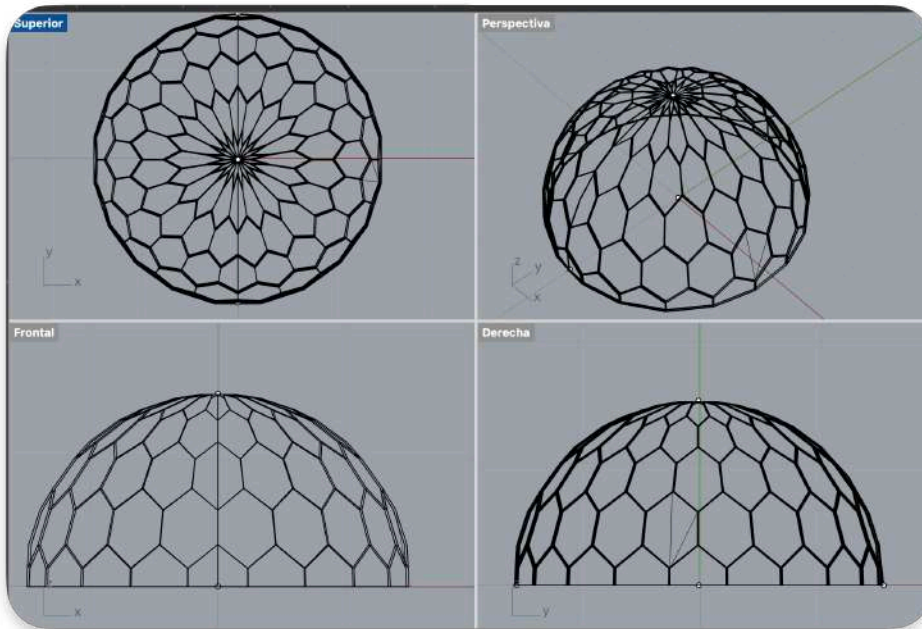


Figura.57: Estructura domo. (fuente: propia)

A partir de la estructura se creó cada uno de los tipos de módulo (5 tipos), se desarrolló un algoritmo para darle espesor y el ángulo de extrusión.

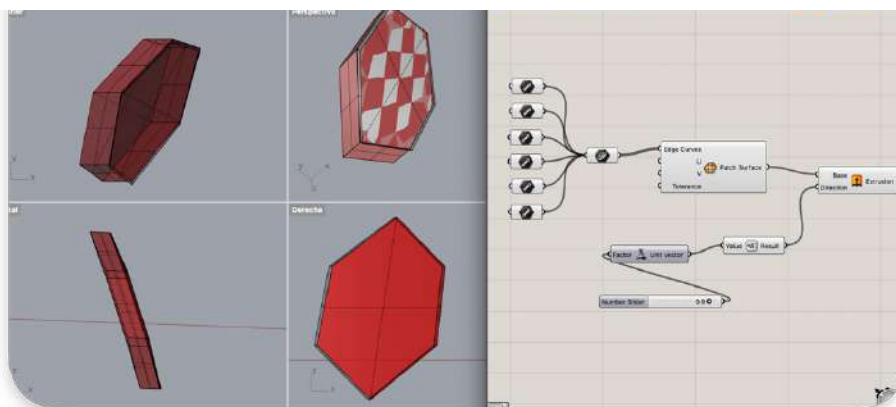


Figura.58: Extrusión de los módulos. (fuente: propia)

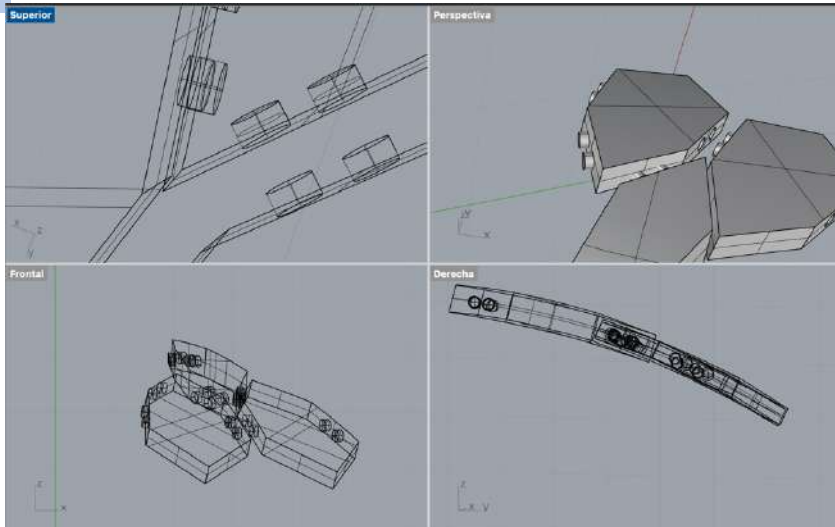


Figura.59: Diseño de uniones. (fuente: propia)

Finalmente se crearon uniones en cada módulo para facilitar su ensamblaje y evitar el uso de algún tipo de elemento para unir cada una de las piezas, como un clavo.

Posteriormente se imprimieron:

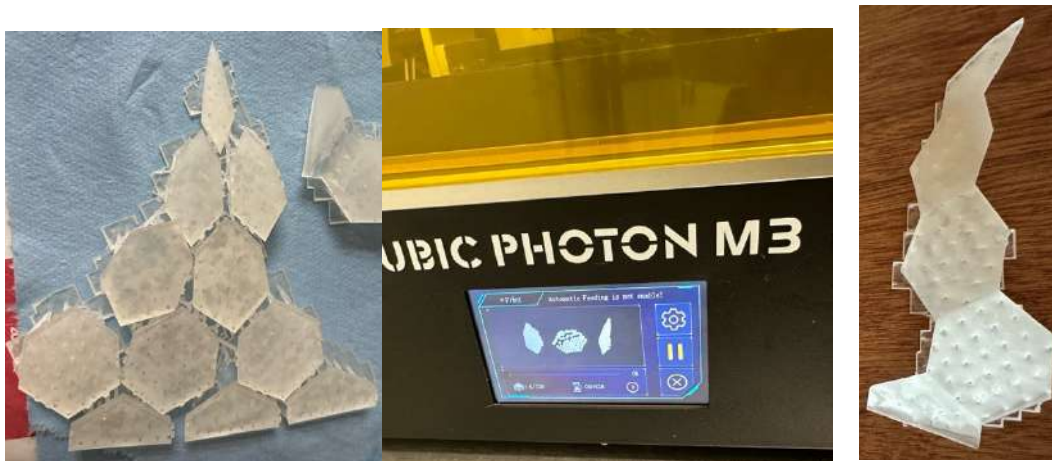


Figura.60: Impresión 3D (fuente: propia)

En la impresión de prototipos se diseñaron dos tipos de armado, el primero módulo por módulo y el segundo en piezas más grandes para mostrar que el diseño generativo nos permite desarrollar diferentes sistemas constructivos en una misma forma geométrica.

En este caso de estudio el objetivo es demostrar que el diseño generativo permite crear formas curvas mediante el diseño modular lo que facilita desarrollar un diseño organizado y rápido. El sistema constructivo de la modulación se formaliza primero en la fabricación para después

trasladar las piezas a la ubicación para su ensamblaje. Este tipo de sistema tiene la capacidad de agregar o reemplazar los módulos de una forma relativamente más fácil.

Las ventajas del diseño modular son las siguientes:

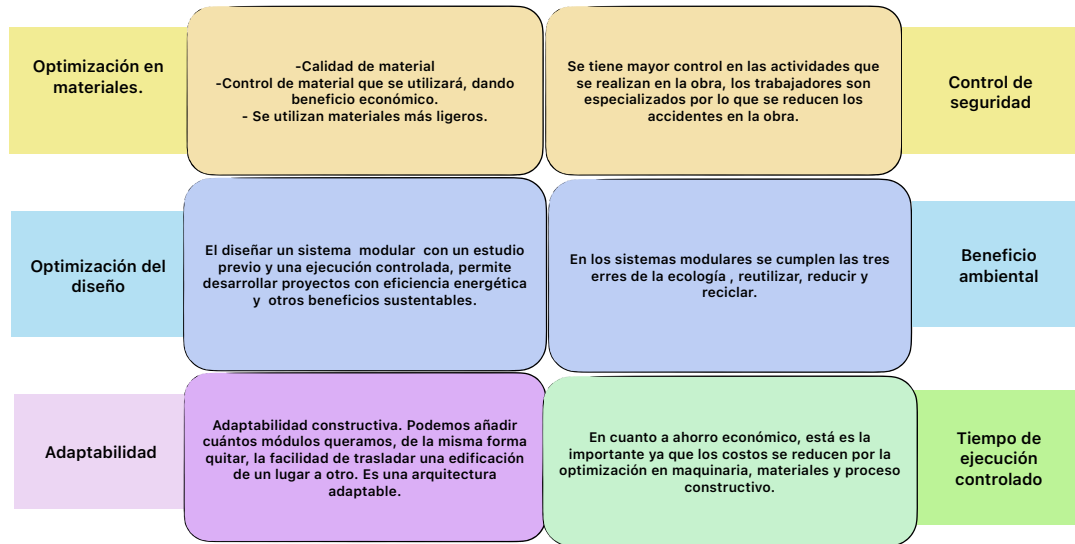


Figura.61: Ventajas del Diseño modular, basado en (Mayén, 2020)(Elaboración: propia)

5.1.1. Ciclo de vida de la madera

El ciclo de vida de los materiales de construcción tiene sus propias características lo que hace interesante su investigación. Las fases del ciclo de vida de la madera pueden coincidir con el análisis de otros materiales como el acero o el concreto. La gran diferencia del ciclo de vida de la madera se encuentra en la parte final

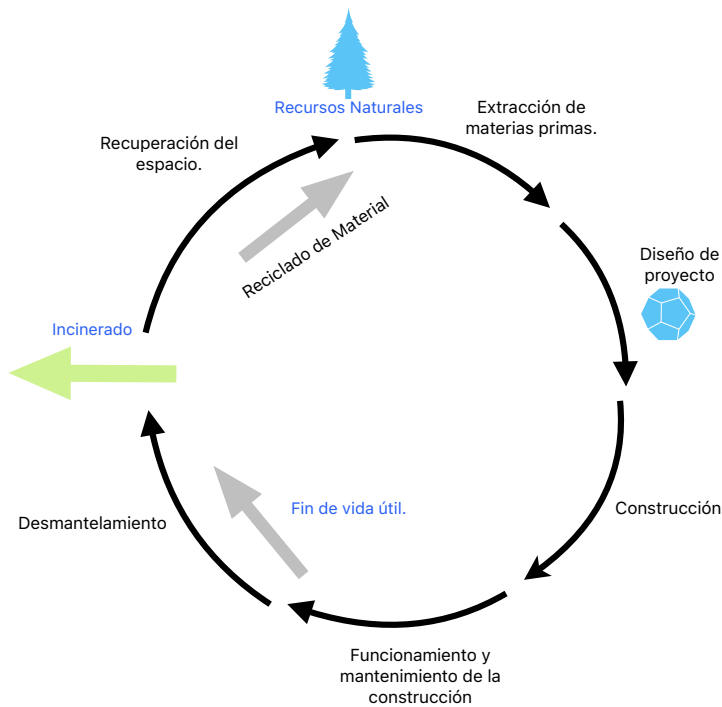


Figura. 62: Ventajas del Diseño modular, basado en (Granda, 2022):Elaboración propia)

Al terminar la vida útil de la obra se realiza el desmontaje, en el ciclo de vida se menciona que la mayoría de las piezas puedan reciclarse, reduciendo las emisiones de carbono y el consumo de energía. Otra fase importante del ciclo de vida es la recuperación de espacio, es decir el terreno vuelve a ser apto para construir. La madera al ser incinerada, el residuo, que sería una biomasa, se convierte en un aglomerado, material utilizado para la construcción.

5.2. Caso 2 Diseño de Pabellón

El sitio que se escogió tiene como objetivo comprobar la influencia del sitio en el rendimiento y la forma del prototipo del pabellón. Se eligió un espacio dentro de las instalaciones deportivas San Antonio Buenavista de la UAEMex (Universidad Autónoma del Estado de México). Este espacio es idóneo para comprobar los objetivos del diseño generativo ya que permitirá el diseño de un pabellón con una conceptualización de acuerdo con la zona, se desarrolló un diseño con aprovechamiento de energía solar, captación de agua pluvial y confort para el usuario.



Figura.63: Ubicación unidad deportiva San Antonio Buenavista, UAEMEX. (fuente: propia)

Los datos que se extrajeron del contexto para el funcionamiento del esquema fueron:

Dimensiones del sitio:

Área: 800m²

Perímetro: 141.5m



Figura.64: Unidad deportiva San Antonio Buenavista, UAEMEX. (fuente: propia)

La **conceptualización** inicial surge a partir de la flor Dahlia, ya que en México prehispánico la dahlias eran conicidad como “acocoxóchitl” que significa tallos huecos con agua. (Mera, 2006). Es una flor endémica de México, posee una gran cantidad de usos, como ornamental, medicinal y alimenticia.

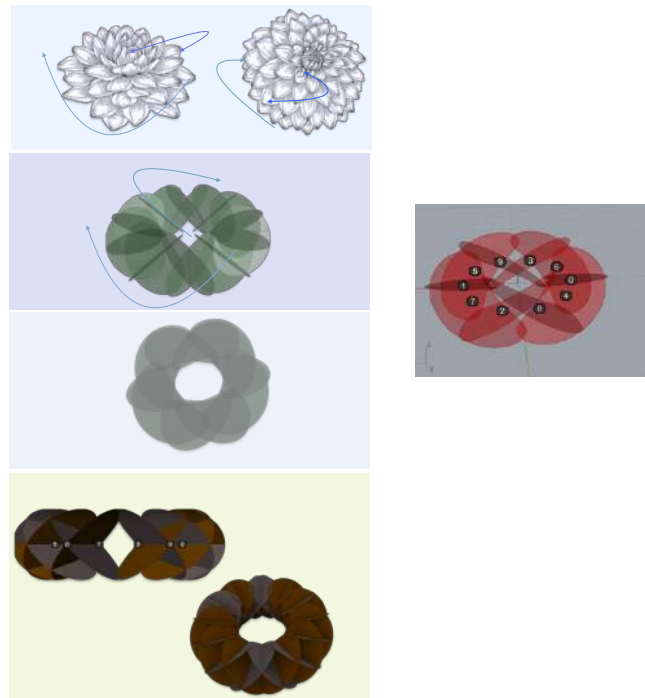


Figura.65: Conceptualización pabellón. (fuente: propia)

A partir de la forma de la flor dalia, se fue desarrollando la geometría del pabellón. En el proceso de diseño se plantearon dos algoritmos, el primero muestra como de acuerdo a los parámetros se adecua la geometría y el software diseña la forma de la pieza para solo ensamblarlas y crear la geometría, el diseño final que se presentan a continuación.

5.2.1. Módulos generativos

En este caso se desarrolló un algoritmo que maneja dos parámetros que rigen la forma y son ángulo y número de piezas, al mover estos parámetros la geometría se diseña en tiempo real y también la pieza para crearla (módulos) no se requiere agregar comandos o moverlos en el algoritmo.

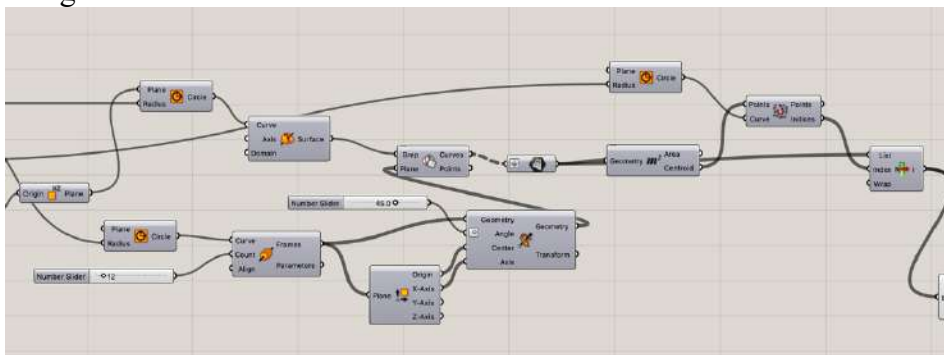


Figura.66: algoritmo módulos generativos. (fuente: propia)

Justamente esta es una de las grandes ventajas del diseño generativo, tener varias opciones de diseño en muy poco tiempo, el diseñador define los parámetros, crea el algoritmo a partir de la forma y necesidades del proyecto arquitectónico. Con la ayuda de los softwares se crea un sin fin de posibilidades, a partir de estas el arquitecto desarrolla la que más se adecue a las necesidades de la zona.

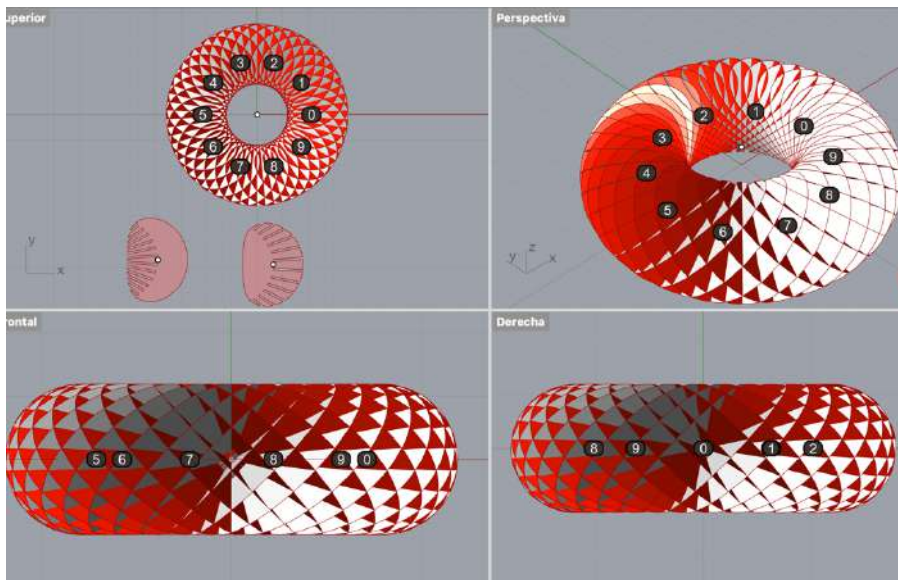


Figura.67: Diseño con parámetros de ángulo a 45° y 40 módulos. (fuente: propia)

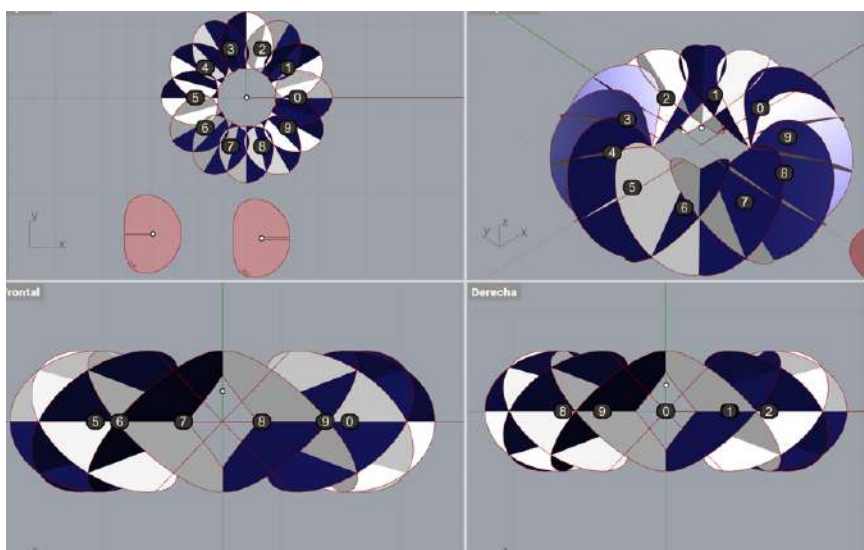


Figura.68: Diseño con parámetros de ángulo a 45° y 12 módulos. (fuente: propia)

También se imprimió en 3D el prototipo de 12 módulos y una parte del de 20.



Figura.69: Impresión prototipos. (fuente: propia)

5.2.2. Pabellón

El diseño final del pabellón se generó con el siguiente algoritmo, el objetivo fue desarrollar un espacio funcional para la zona de estudio mencionada

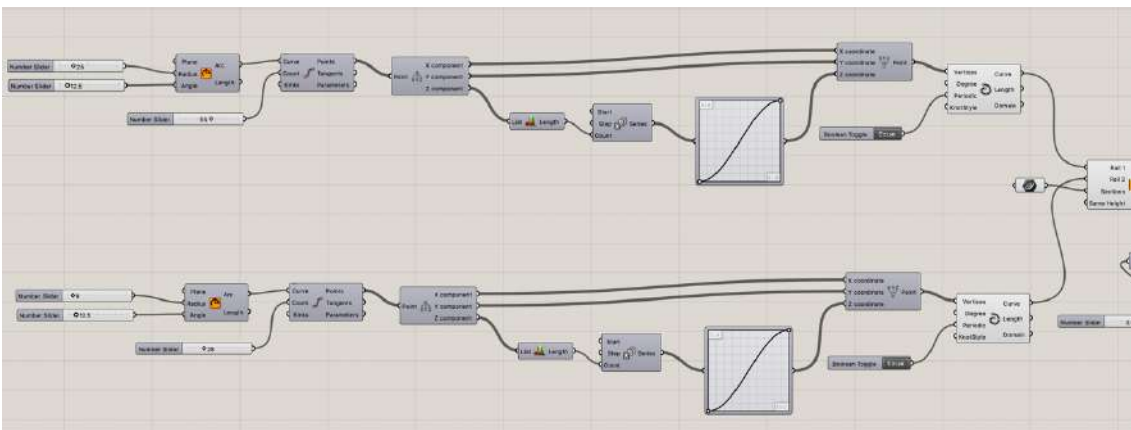


Figura.70: Algoritmo pabellón. (fuente: propia)

La forma va en relación con el concepto planteado la flor dalia, es una forma sencilla, pero con un complejo constructivo amplio, el objetivo es crear un espacio funcional y visualmente atractivo para los usuarios con un concepto mexicano.



Figura.71: Vista lateral. pabellón. (fuente: propia)



Figura.72: Vista planta pabellón. (fuente: propia)

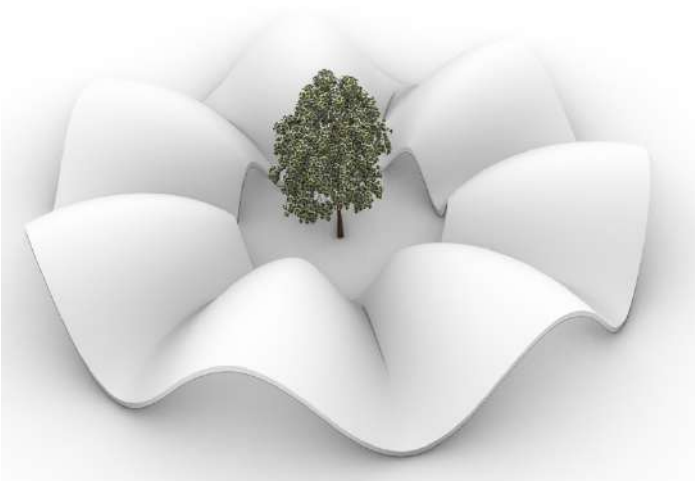


Figura.73: Vista perspectiva pabellón. (fuente: propia)

5.3. Comparación

De acuerdo a los objetivos planteados en la investigación se mencionó que se realizaría una comparativa con los pabellones que ya existen en México y el diseño desarrollado en la investigación.

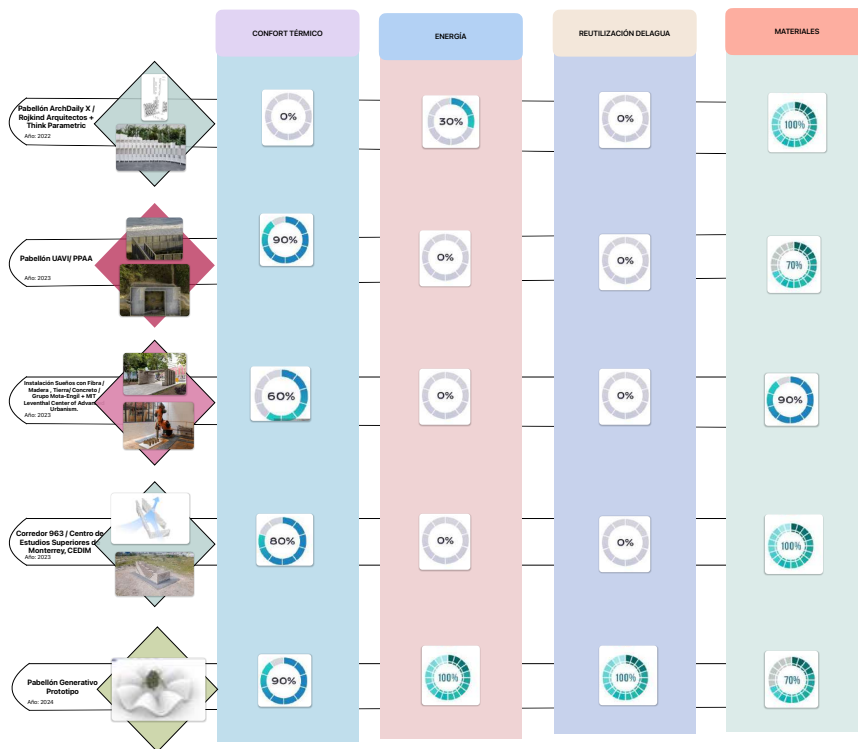


Figura. 74: Comparación de pabellones. (fuente: elaboración propia)

La figura 74 muestra que cada uno de los pabellones tiene al 100% una variable comprobando que en México ya se están desarrollando construcciones sustentables, aun son a escala muy pequeña pero ya está el inicio de una nueva era en la construcción mexicana. El pabellón planteado cubre casi todas las variables, solo en material falta desarrollar un poco más el sistema constructivo y en confort térmico no podemos tener el 100% debido a que el clima en Toluca, México es muy cambiante y depende mucho de las estaciones del año. El diseño generativo permite desarrollar obras sustentables y con formas muy atractivas, permitiendo la innovación en los sistemas constructivos en México.

5.4. Relación de elementos y medición.

Como se menciona en la hipótesis si se implementa una propuesta generativa en el diseño sustentable de espacios públicos en México, entonces se disminuye el impacto ambiental. A continuación, se presentan los elementos que se analizaron para aplicarlos al pabellón y reducir el impacto ambiental. Así mismo como las herramientas con la que se midieron.

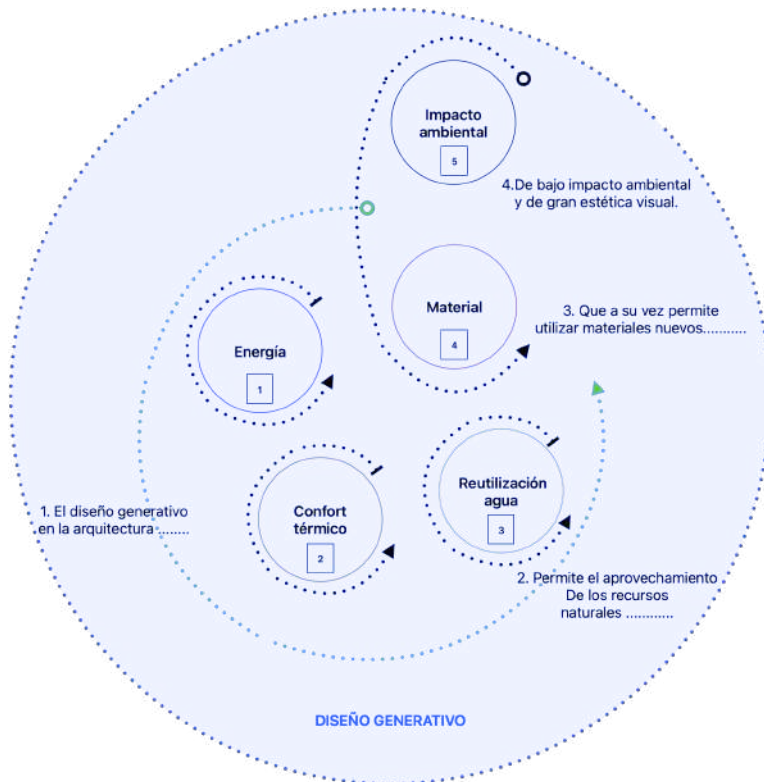


Figura. 75: Elementos de análisis del pabellón. (fuente: elaboración propia)

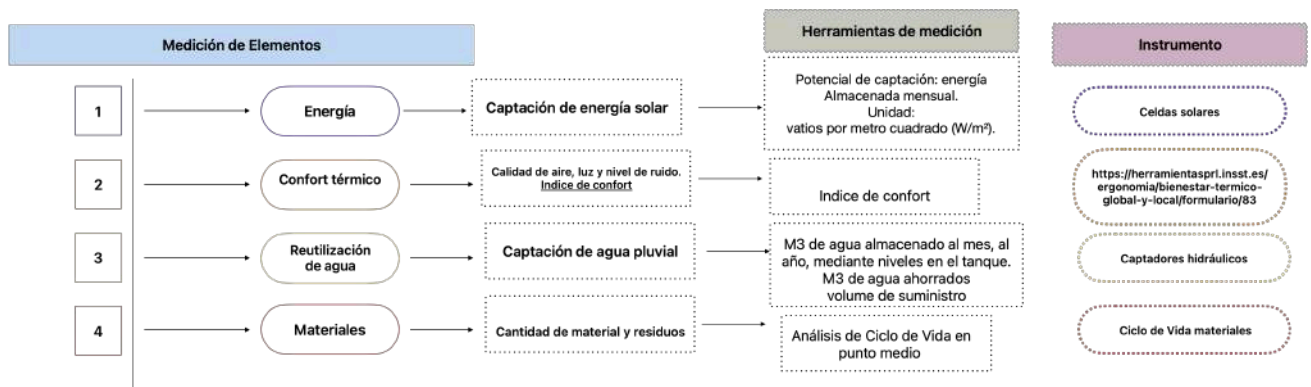


Figura. 76: Herramientas e instrumentos de medición de los elementos. (fuente: elaboración propia)

5.4.1. Estudio de solarimetría y su aplicación

Para el cálculo del aprovechamiento de energía se utilizó el software Irradiación Global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. (Estrada - Cajjal, 2005).

Se realizó la siguiente tabla con los datos de la zona:

Irradiaciones diarias promedio mensual global horizontal e inclinada.

$\varphi = [^\circ]$	19.282	(latitud)
$\lambda = [^\circ]$	-99.677	(longitud)
$z = [m]$	2710	(altitud)
[MJ/m²]	Horizontal MJ /m²	Inclinada MJ/ m²
Enero	15.7324	18.5206
Febrero	17.7504	19.8126
Marzo	19.2244	20.0425
Abril	19.3961	19.0349
Mayo	18.8836	17.7756
Junio	18.7363	17.2789
Julio	17.5891	16.4075
Agosto	17.5209	16.8575
Septiembre	16.8069	16.9279
Octubre	15.7455	16.7875
Noviembre	15.2204	17.4872
Diciembre	13.8744	16.2872

Tabla 1: Irradiación diaria promedio mensual global horizontal e inclinada. Elaboración con apoyo de (Martínez C. I., 2024)

Los datos que se muestran en la tabla 1 se refiere a la Irradiación diaria promedio global horizontal que es la que incide en el plano de captación como si la superficie fuera plana. (figura:77)

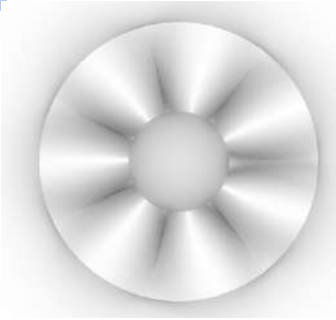


Figura.77 : Vista Planta Pabellón. (Elaboración: propia)

La segunda columna de la tabla (tabla 1), se presenta el cálculo de la Irradiación global Inclinada, es un promedio de la irradiación de todos los días del mes y se calculó de acuerdo a la latitud del lugar, en este caso se tomó una inclinación de 19° orientado al sur.

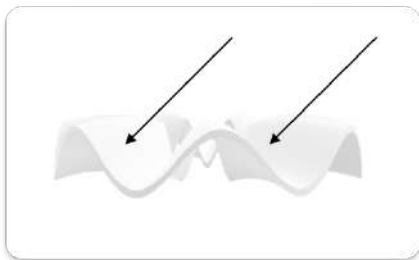


Figura.78 : Vista lateral Pabellón. (Elaboración: propia)

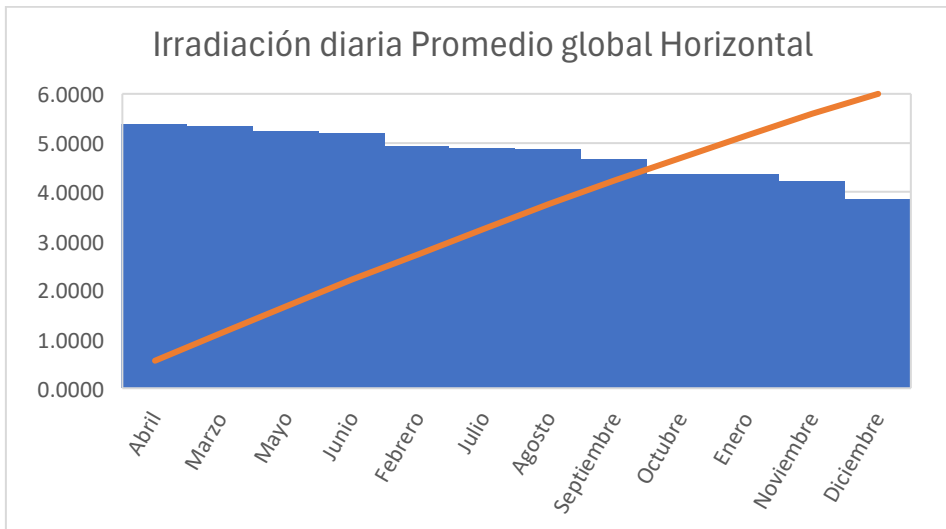
Los valores que se muestran se encuentran en **MJ/m²** pero para el manejo más fácil de los mismos se convierten en **KW / h** ya que así se utilizan comercialmente.

[MJ/m²]	Horizontal KW / h.	Inclinada KW / h.
Enero	4.3701	5.1446
Febrero	4.9307	5.5035
Marzo	5.3401	5.5674
Abril	5.3878	5.2875
Mayo	5.2454	4.9377
Junio	5.2045	4.7997
Julio	4.8859	4.5576

Agosto	4.8669	4.6826
Septiembre	4.6686	4.7022
Octubre	4.3738	4.6632
Noviembre	4.2279	4.8576
Diciembre	3.8540	4.5242

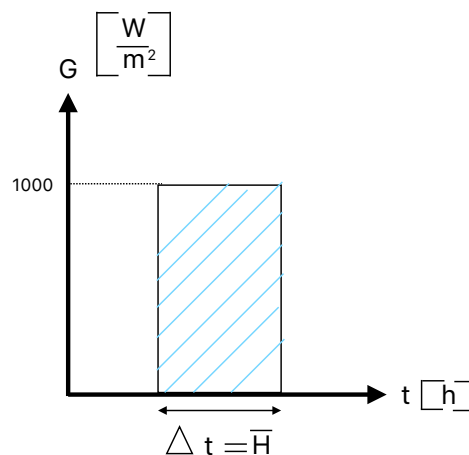
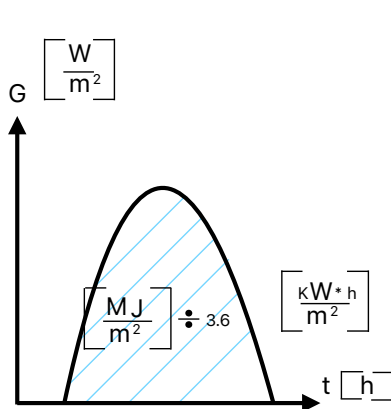
Tabla 2: Irradiación diaria promedio mensual global horizontal e inclinada en kW/h. Elaboración con apoyo de (Martínez C. I., 2024)

A partir de los valores de la tabla se presenta las siguientes gráficas.



Gráfica 1: Irradiación diaria promedio mensual global Elaboración propia.

La gráfica muestra la energía solar a lo largo del año lo que significa que las horas pico (las horas en las que hay mayor radiación) oscila entre los 3.5 y 5.5 KW/h en los meses de julio a septiembre.



Gráfica 2 y 3: Irradiación diaria de todo el día; explicación gráfica. Elaboración propia.

La gráfica 2, representa la irradiación del modelo el cual está representado de manera gráfica y es el área bajo la curva = a la irradiación de todo el día; donde la potencia por tiempo es iguala a energía.

De acuerdo con las horas pico que representa la gráfica 1 en la gráfica 3 donde la curva de hace un rectángulo cuya irradiancia fuera de 1000 y la delta del tiempo es igual a la irradiación diaria promedio mensual.

De acuerdo con los cálculos presentados y para aplicarlos al proyecto se utilizan celdas solares flexibles



Figura.79: Celda solar flexible. (Fuente: (inarquia, 2023))

Son paneles que se adaptan a cualquier superficie, las placas fotovoltaicas flexibles cuentan con un sistema interno que permite que sus células de silicio capten la radiación solar sin necesidad de una estructura rígida.

Las ventajas de los paneles solares son:

- Alta resistencia: este tipo de paneles son resistentes a las condiciones climáticas, su vida útil oscila entre 25 y 40 años.
- Sistema económico: su instalación es muy económica y rápida.
- Ahorro de espacio: son muy delgadas por lo que no requieren de tanto espacio como las celdas fotovoltaicas convencionales.
- Ligereza: pesan 75% menos que los paneles convencionales. (inarquia, 2023))



5.4.2. Aprovechamiento hídrico

El estrés hídrico afecta a la cuarta parte de la población mundial, la demanda de agua continúa en aumento debido al incremento de la población. En la agricultura se utiliza alrededor del 70% de agua dulce global, lo que ocasiona que la cadena de suministros de alimentos y bebidas sea altamente sensible al estrés hídrico, (Caballero, 2017).

En México, el 76 % del agua se utiliza en la agricultura; 14 %, en el abastecimiento público; 5 %, en las termoeléctricas y 5 %, en la industria (CONAGUA, 2024). Por lo que los mantos acuíferos de agua se encuentran sobreexplotadas, lo que está generando mucha escasez en la mayoría de los Estados. Por esta razón es necesario aprovechar el agua al máximo y una gran iniciativa es crear construcciones que capten agua pluvial. Para el diseño del pabellón se calculó de la siguiente manera:

Primero se realizaron dos tablas, la primera son las precipitaciones en Toluca, México (Vilchis-Francés et al, 2015). Se consideraron de los 360 días del año por 40 años (tabla 3), y la segunda son valores de consumo diario de agua que se utiliza en la zona donde se construirá la obra.

Los datos solicitados en el módulo desarrollado por Fonseca (Fonseca et al, 2017) fueron:

- Vector precipitación
- Vector demanda de agua
- Área tributaria; en este caso es concreto, el cual tiene un coeficiente de escurrimiento de **0.95** (Zegarra T. J., 2015)



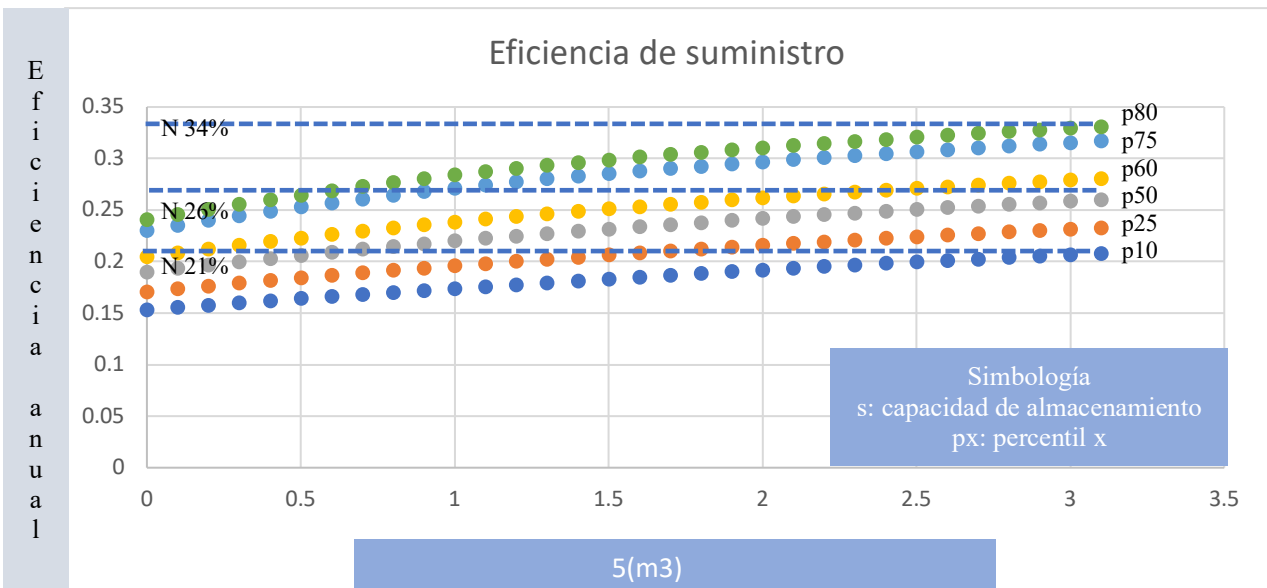
Desv estándar	S (m3)	Años							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0.03720083	0	0.31009281	0.138596	0.12032641	0.19501187	0.22367174	0.1862868	0.14690069	0.22447397
0.03835279	0.1	0.32256537	0.14110555	0.12236176	0.19764965	0.22642108	0.18900019	0.15009136	0.22756104
0.03952255	0.2	0.33478916	0.14337202	0.12435072	0.20013214	0.22917041	0.19155526	0.15325201	0.23051723
0.04063641	0.3	0.34616442	0.14554565	0.12628191	0.20261464	0.23191975	0.19402379	0.15631001	0.23346953
0.04173461	0.4	0.35711087	0.1476871	0.12816714	0.20509713	0.23466908	0.19648509	0.15929409	0.23618129
0.04273367	0.5	0.36704796	0.14982854	0.13002612	0.20757963	0.23741842	0.19887395	0.16213574	0.23868139
0.04363733	0.6	0.3760282	0.15196765	0.13179387	0.21001408	0.24010456	0.20114094	0.1648812	0.24114476
0.0445435	0.7	0.38495961	0.15404002	0.13347688	0.21242619	0.24276008	0.20340418	0.16751512	0.24350611
0.04537934	0.8	0.3931112	0.15611239	0.13514691	0.21472894	0.24533399	0.20560639	0.1700825	0.24567949
0.04619077	0.9	0.40109364	0.15805892	0.13681132	0.2170036	0.24786041	0.20774907	0.17260535	0.24779095
0.04683529	1	0.40754285	0.15991988	0.13838997	0.21917687	0.25021446	0.20980576	0.17512821	0.24990241
0.04742095	1.1	0.41352968	0.16167541	0.13995562	0.2212565	0.25250975	0.21176045	0.17762577	0.25201386
0.04800668	1.2	0.41951651	0.1633333	0.14152127	0.2232862	0.25473894	0.21358918	0.18007442	0.25412402
0.04850645	1.3	0.42473989	0.16499119	0.14308692	0.22513421	0.25696813	0.21533841	0.18248039	0.25616509
0.04886014	1.4	0.42859435	0.1665231	0.14461837	0.22691651	0.25911649	0.21702913	0.18485484	0.25820617
0.04917263	1.5	0.43208667	0.16797376	0.14613183	0.22869881	0.26119036	0.21871318	0.18722929	0.26020979
0.04949185	1.6	0.43557899	0.16942442	0.14764529	0.23048112	0.26316723	0.22032163	0.18960374	0.26215752
0.0497787	1.7	0.43869241	0.17084307	0.14915875	0.23225622	0.26505303	0.22181136	0.19194161	0.26405783
0.05004793	1.8	0.44168582	0.17218237	0.15061527	0.23397487	0.26691069	0.22330109	0.19422285	0.26593892
0.0502767	1.9	0.44429387	0.17341509	0.15202435	0.23569353	0.26876762	0.22479083	0.19637484	0.26776885
0.05049489	2	0.44678838	0.17458944	0.15338334	0.23734963	0.2704929	0.22628056	0.1984924	0.26959878
0.05070989	2.1	0.44928289	0.17576378	0.15468424	0.23899021	0.2720522	0.22770773	0.20057005	0.27138678
0.0508795	2.2	0.4512785	0.17693812	0.15589385	0.24055664	0.27353613	0.22913269	0.20256619	0.27313293
0.05105126	2.3	0.45327411	0.17811246	0.15708827	0.24203079	0.27494795	0.2305033	0.20444904	0.2748221
0.05123573	2.4	0.45526972	0.1792868	0.15823641	0.24343117	0.27635977	0.23179872	0.20628148	0.27651126



0.05143392	2.5	0.45726533	0.18046114	0.15934928	0.24481283	0.27777159	0.23309414	0.20806231	0.27820043
0.05163838	2.6	0.45926094	0.18163548	0.16030668	0.24614956	0.27918341	0.23438956	0.20978966	0.27983315
0.05185031	2.7	0.46125655	0.18280982	0.16113215	0.24748629	0.28053189	0.23568499	0.21149629	0.28145193
0.05205728	2.8	0.4631297	0.18397023	0.1618841	0.24882301	0.2817951	0.23698041	0.21320293	0.28307071
0.05218815	2.9	0.4642905	0.1850755	0.16261473	0.2501191	0.28305831	0.23827583	0.21490957	0.2846895
0.05229322	3	0.4652883	0.18618076	0.16334537	0.25139218	0.28430057	0.23957125	0.2166162	0.28630828
0.05239172	3.1	0.46628611	0.18728602	0.16402703	0.25266525	0.28548947	0.24086667	0.21832284	0.28781614

Tabla 3: Demanda diaria de Agua. Elaboración propia simbología, s: desviación estándar de la demanda diaria

En tabla 3 se muestra el cálculo de la demanda diaria de agua en los próximos 40 años, en la columna de color naranja se muestra la desviación estándar (variación entre las deficiencias anuales de captación) en m^3 , por lo que el contenedor de agua debe tener una capacidad de $3.1 m^3$ (3100 litros), considerando que se vaciará y se llenará dependiendo de la época del año. Con este captador los servicios proporcionan en promedio el 26% de la demanda. Para un año seco podría proporcionar 21% y para un año húmedo hasta 32%.



Gráfica 4: Eficiencia Anual de agua. Elaboración propia.

Los puntos que están cerca del 0.25 con probabilidad del 90% son años húmedos y los que se encuentran cerca del 0.15 tienen probabilidad de ser años secos.

Entonces a partir del cálculo de la demanda diaria, la eficiencia anual y la eficiencia de suministro se concluye que el contenedor de agua requerido para el correcto funcionamiento de los servicios de sanitarios de la Unidad deportiva es de 3100 litros.

Lo que conlleva al aprovechamiento de la forma del pabellón para la colocación de bajadas de agua y su captación en el contenedor.

5.4.3. Cálculo Estructural

El cálculo estructural es indispensable para cualquier obra ya que determina la seguridad y estabilidad de la obra. En este proceso se calculan cargas que actúan sobre la estructura para tener la seguridad de que la construcción no se deformará y será segura.

En este caso para dar un **criterio estructural** del pabellón se utilizó el plug-in de grasshopper Kangaroo, es un motor Live Physics que sirve para simulación interactiva, optimización y búsqueda de soluciones estructurales.



Figura 80: Logo Kangaroo grasshopper. (Piker, 2017)

Lo primero que se coloca en el algoritmo es el valor del módulo de elasticidad y densidad de los materiales (Physics, 2024), que se quieren analizar; para este caso se analizaron acero, madera de pino, madera de roble y bambú.

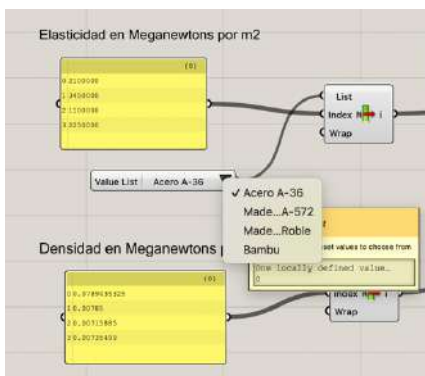


Figura 81: Valores densidad y elasticidad grasshopper. Elaboración: propia

A partir de una superficie se arma una estructura tridimensional a base de líneas y puntos (barras y nodos) y se le agregan las cargas gravitacionales.

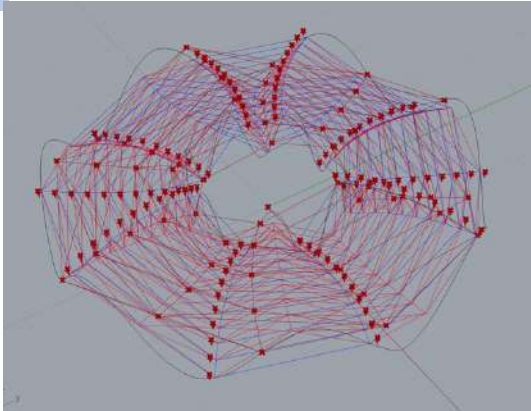


Figura 82: Estructura tridimensional rhinoceros. *Elaboración: propia*

Los nodos (se miden en Newtons) conectan la estructura lo que significa que las cargas estarán en los nodos y a estos nodos se les aplicará una fuerza en eje z, con valor de 0.05 a 60 Newtons.

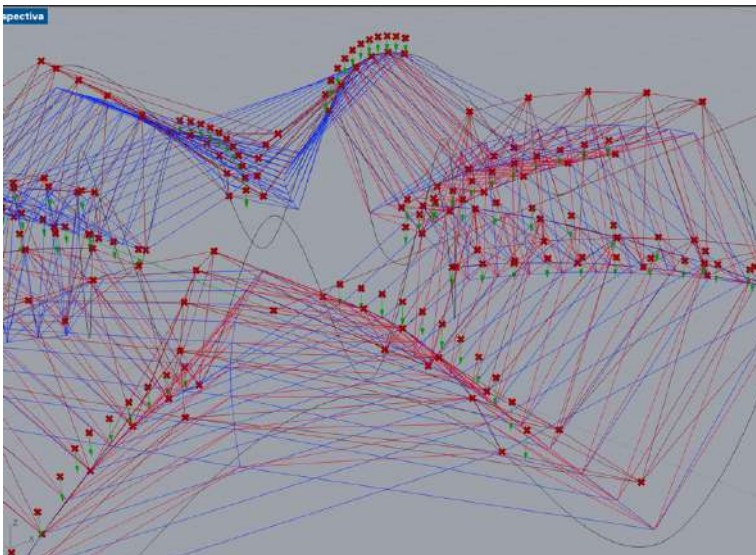


Figura 83: Puntos de carga o apoyo. *Elaboración: propia*

Se definen los puntos de apoyo o soporte de la estructura.

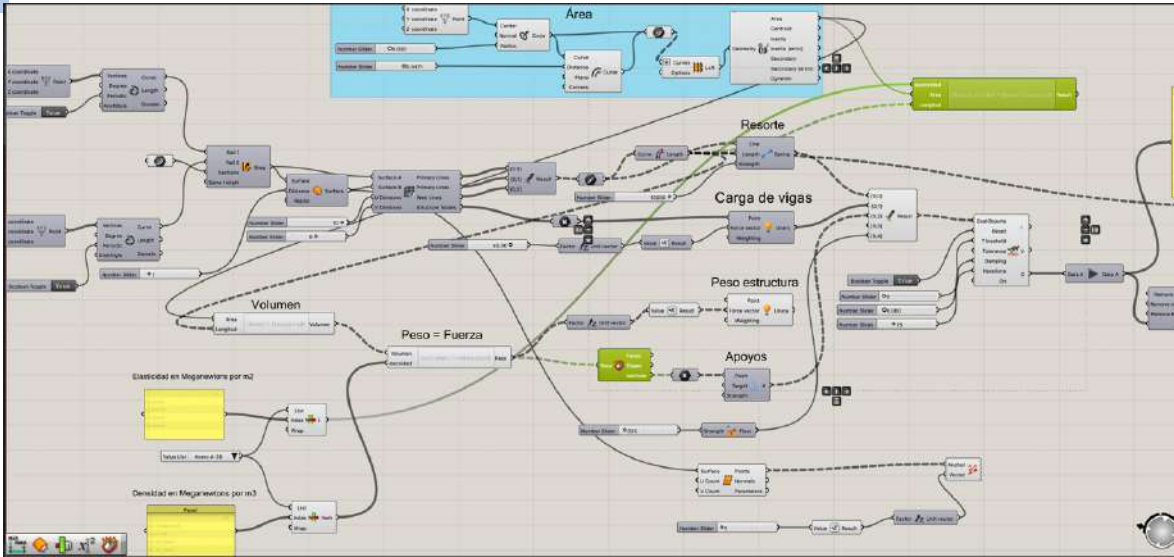


Figura 84: Algoritmo grasshopper. *Elaboración: propia*

En el algoritmo planteado, los parámetros que definen la estructura son: resorte que se refiere al módulo de elasticidad, las cargas de las vigas que es la fuerza de resistencia, el peso de la estructura y los apoyos. Los parámetros se calcularon de acuerdo con el volumen, peso y el valor del área se aplicó en las fórmulas volumen y en la del Módulo de Young la cual mide si el módulo de elasticidad va en relación a la fuerza.

Peso de la estructura = Fuerza cargas: cuantas unidades de material hay en un cuerpo con determinado volumen, esto es densidad.

Como cada unidad material representa átomo o molécula y estos tienen masa, se mide en gramos o en kilogramos, entonces la densidad representa cuanto gramos o kilogramos pesa sobre una unidad de medida.

El módulo de elasticidad es la resistencia de un material al ser deformado. En mecánica lo importante es la fuerza aplicada por unidad de área; llamamos esfuerzo a esta cantidad. Al grado de estiramiento y compresión que se produce mientras el material responde al esfuerzo lo llamamos deformación. Se mide el esfuerzo con el cociente de la diferencia en la longitud

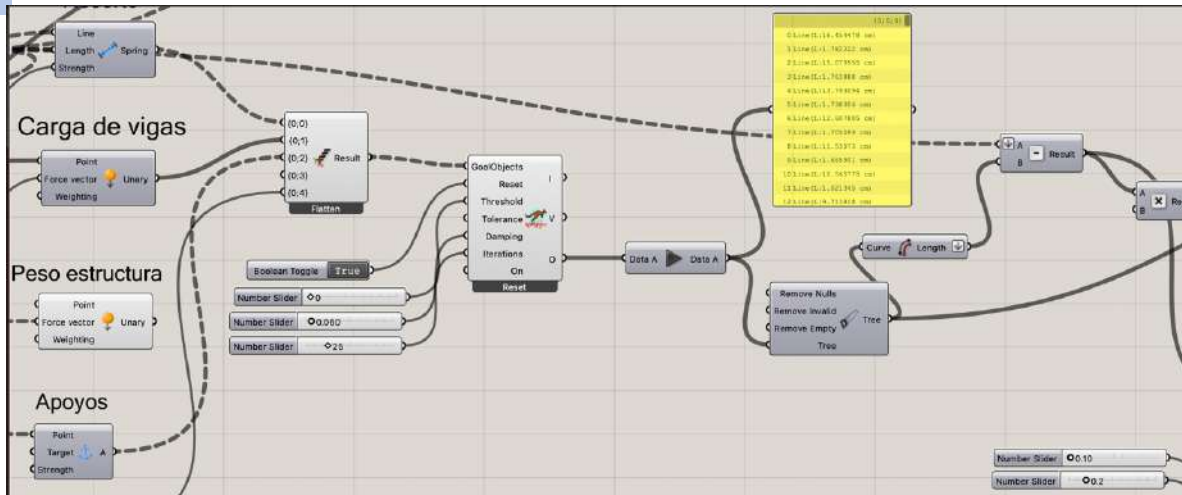


Figura 85: Simulador Kangaroo grasshopper. *Elaboración: propia*

Se cargan todos los parámetros al simulador de Kangaroo y a partir de este se hace un mapeo de esfuerzos.

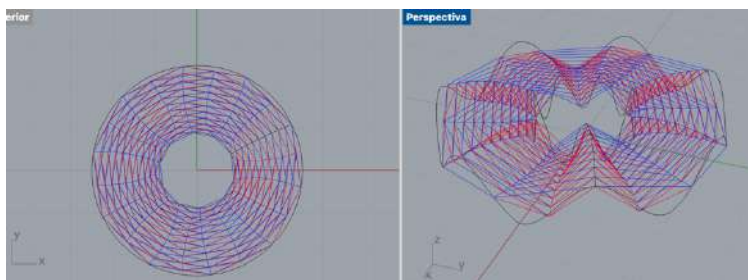


Figura 86: Estructura rhinoceros. *Elaboración: propia*

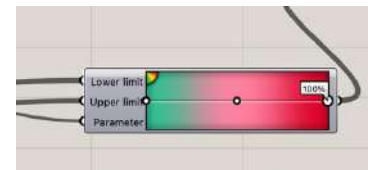


Figura 87: Comando Gradient. *Elaboración: propia*

Los elementos centrales (color rojo) son los que tienen la carga a compresión y los elementos laterales (color azul) son a flexión. Se controlan por el comando “gradient”, ya que define los valores como negativos y positivos y los negativos son los que se refieren a compresión, los positivos a flexión.

Por lo tanto, la simulación de kangaroo nos muestra la relación entre elasticidad y densidad, para saber cuánto podemos deformar el material.

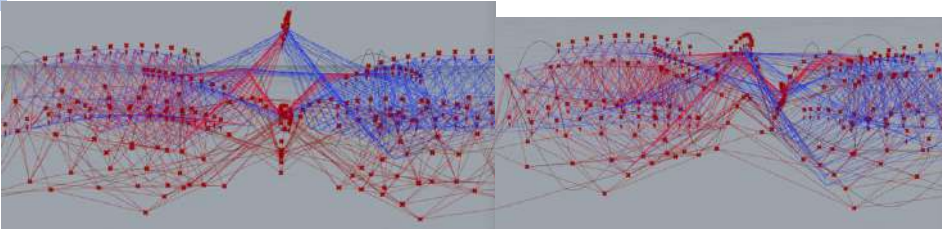


Figura 87: Simulación estructura FALLA. Elaboración: propia

Figura 8: Simulación estructura. Elaboración: propia

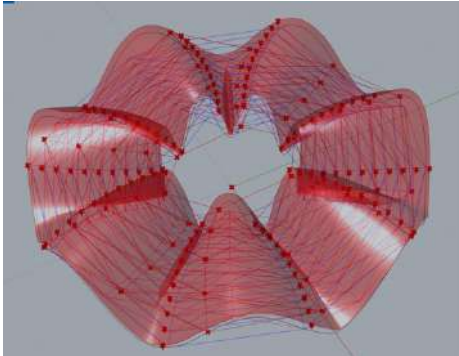


Figura 88: Simulación estructura. Elaboración: propia

5.4.4. Confort usuario

Como se mencionó el tema 5 del capítulo 5 con la utilización del software desarrollado por el Instituto nacional de seguridad y salud en el trabajo de España (INSST, 2023).

Funciona con un método basado en la norma UNE-EN ISO 7730 para la predicción de la sensación térmica general y el grado de incomodidad de los usuarios.

Los resultados obtenidos para el pabellón fueron:

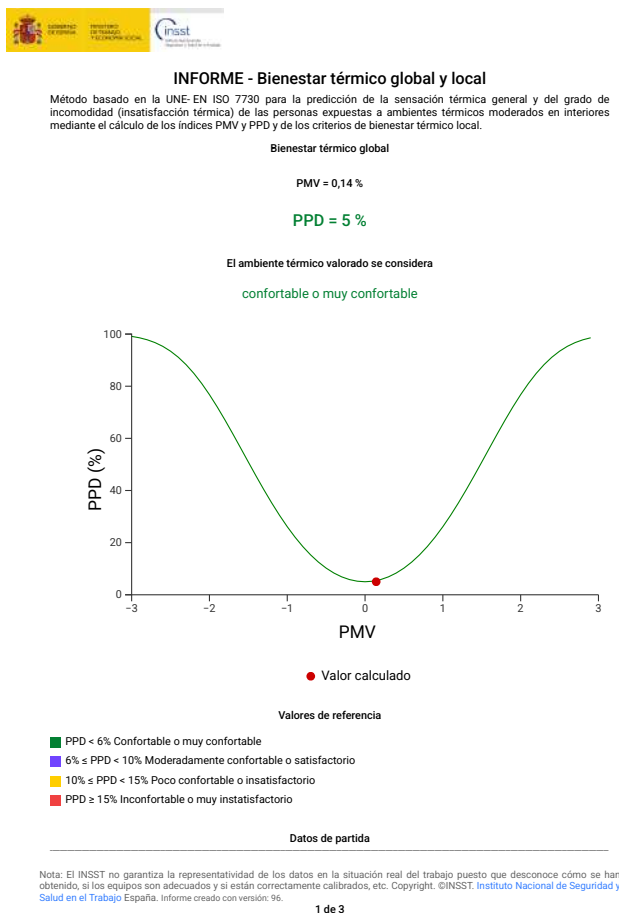


Figura 89: Confort térmico. *Elaboración: propia*

El pabellón tiene un confort térmico confortable, pero esto sucede solo cuando la temperatura esta entre los 16 a 19 grados centígrados. En las demás temperaturas el confort no es el ideal, también depende de la vestimenta que utilice el usuario.

6. DISCUSIÓN Y PROTOTIPOS FINALES

6.1. Discusión.

De acuerdo con los resultados de la investigación el diseño generativo desarrolla diseños adaptables, es decir se transforma de acuerdo con los valores de los parámetros. La presente investigación muestra como el diseño generativo mejora el diseño ya que permite mayor funcionalidad mediante la optimización, captación de agua, captación de energía solar, usar materiales de menos impacto al ambiente, etc., además de mostrar una geometría estéticamente atractiva

El diseño digital permite predefinir fácilmente las condiciones mientras se genera la forma final, permitiendo que se ingresen requisitos físicos, como la cantidad de carga que tendrá que soportar el diseño. Con esta información se pueden escoger materiales innovadores, el programa hace simulaciones para tener el funcionamiento correcto de la estructura.

Al trabajar con un sistema multidisciplinario se obtiene como resultado un proyecto arquitectónico completo con funciones en beneficio de la sustentabilidad.

6.2. Prototipo Final

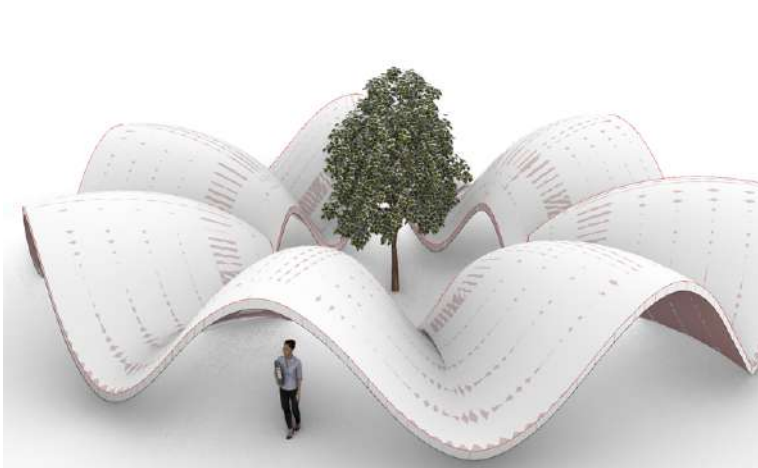


Figura 90: Pabellón Elaboración: propia



Figura 91: Pabellón vista lateral. Elaboración: propia



Figura 92: Pabellón Elaboración: propia

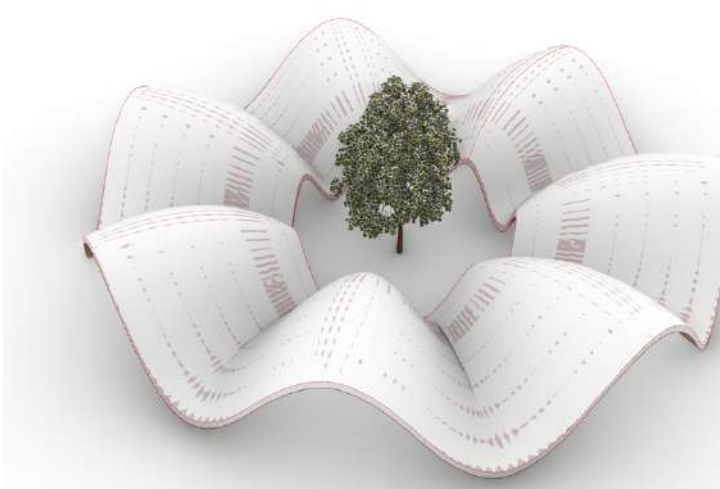


Figura 93: Pabellón perspectiva Elaboración: propia

6.3. Limitantes de la investigación

En la investigación la mayor limitante fueron el financiamiento de la construcción del diseño a escala real y con el material mencionado para desarrollar un estudio más profundo del sistema constructivo y comprobar que funcione de manera correcta.

También el criterio estructural requiere de más análisis para poder ejecutarlo.

CONCLUSIONES

La investigación al ser de carácter exploratoria, y ser punto de arranque para futuras investigaciones debido a la recopilación de información sobre ventajas de la arquitectura generativa. Se presenta un proyecto válido el cual busca dar soluciones a problemas actuales arquitectónicos en el contexto de una economía emergente. El proyecto considera materiales de la zona, características del contexto y funcionamiento del diseño en beneficio de la sustentabilidad. A partir de esto se mencionan las siguientes conclusiones:

De acuerdo con el concepto y al desarrollo de los algoritmos para el diseño de la forma del pabellón, se obtuvieron 40 soluciones que cumplen con los parámetros establecidos. Por lo que resulta muy complejo intentar descubrir una solución óptima y definitiva de diseño. Justamente esto es la importancia del diseño generativo, ya que, al diseñar con un esquema multidisciplinario, permite dar soluciones a problemas arquitectónicos complejos, el espacio de diseño alcanza una magnitud inmensa, por esta razón al diseñar de forma generativa es importante dar continuidad dentro del espacio de diseño para obtener resultados óptimos sin tener un número de soluciones excesivo.

El caso de estudio presentado; presenta de manera favorables que el diseño generativo permite reducir el consumo de material ya que solo se utiliza el necesario, se mejora la calidad, por el control de las variables y se disminuye el impacto ambiental, desde el material hasta el aprovechamiento de los recursos naturales.



El diseño generativo busca la imitación de las formas de la naturaleza (biomimética) permite entender la manera que en la que la naturaleza resuelve problemas estructurales, permitiendo la utilización de materiales con menor impacto ambiental. La arquitectura debe ser contextual es decir tener relación visual del edificio con su entorno, y es a partir del contextualismo como se define la forma y el estilo arquitectónico del diseño.

Mediante la fabricación digital, utilizando procesos aditivos se utiliza maquinaria automatizada para crear modelos en 3D, estableciendo nuevas tendencias y estilos no solo visuales sino también sustentables.

El valor de la presente investigación reside en presentar el diseño generativo en un contexto real de una economía emergente y mencionar la importancia de la arquitectura en la sociedad, incitando a futuras generaciones a realizar investigación más a detalle de los cambios que traen las herramientas digitales a la arquitectura tradicional.

RECOMENDACIONES.

- El aparatado ambiental muestra los cálculos de confort térmico, captación de agua pluvial y captación de energía solar. Se recomienda profundizar el estudio para obtener la optimización del rendimiento ambiental, es decir calcular como funcionarían estos aspectos cuando el pabellón este construido.
- La presente invetigacion requiere de un estudio más exhaustivo, ya que se menciona de manera general pero falta profundizarlo más, en el que se muestre una simulación real de como se armaría la estructura.
- Desarrollo de piezas a escala real, para análisis de mayor impacto así mismo se sugiere tener contacto con una impresora 3D de concreto para comprobar su funcionamiento real en obra.



- Se recomienda realizar experimentación con alumnos de diseño o talleres de proyectos, sobre el empleo de sistemas generativos con el propósito de incrementar la posibilidad de generar diversos resultados de diseño.
- Por último se recomienda implementar metodologías de enseñanza para las herramientas digitales pero de una manera interdisciplinaria para que los futuros arquitectos contemplen los componentes que requiere un proyecto arquitectónico.

Referencias

- Caballero, K. (2017). *Estrés hídrico y desigualdad, factores que encarecen el agua*. Obtenido de Gaceta UNAM: <https://www.gaceta.unam.mx/estres-hidrico-y-desigualdad-factores-que-encarecen-el-agua/>
- Carrilo, A. (2016). *La Bio Computacional en el proceso de Diseño Arquitectónico*. México: Tesis para obtener el título de Arquitecto, de Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lars, H. (2020). *PLP Architecture*. Obtenido de Architecture International: <http://www.plparchitecture.com/lars-hesselgren.html>
- CEDIM, C. d. (2023). *Corredor 963 / Centro de Estudios Superiores de Diseño de Monterrey, CEDIM*. Obtenido de ArchDaily: <https://www.archdaily.mx/mx/1014153/corredor-963-centro-de-estudios-superiores-de-diseno-de-monterrey-cedim>
- CNN. (2022). *La arquitectura orgánica, un retorno a la naturaleza que es tendencia en México de la mano de Javier Senosiain*. Obtenido de CNN cultura: <https://cnnespanol.cnn.com/2022/05/20/disenio-mx-arquitectura-organiza-orix/#:~:text=La%20arquitectura%20orgánica%20%22busca%20la,las%20geográficas%20—la%20orientación%2C%20la>
- Coarins. (2022). *Análisis del Centro Cultural Haydar Aliyev*. Obtenido de equipo COARINS: <https://coarins.com/obras-famosas/centro-cultural-heydar-aliyev/>
- CONAGUA. (2024). *INEGI*. Obtenido de cuename inegi: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T#:~:text=En%20México%2C%2076%20%25%20del%20agua,Pie%20chart%20with%204%20slices.&text=End%20of%20interactive%20chart>
- Construcía. (2018). *Arquitectura biónica, de la naturaleza a la edificación*. Obtenido de Construcía Noticias: <https://www.construcia.com/noticias/arquitectura-bionica/>
- Lozano, T. (2010). Optimización estructural evolutiva. *UNAM, Tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico*.
- Lózar, M. (2014). *Brick- Topia*. Obtenido de Despierta y mira: <https://www.despiertaymira.com/2014/01/bricktopia/>



- Lyon, A., & García, R. (2013). Forma arquitectónica y estructura a través de la Optimización Topológica. Nuevos métodos para antiguos problemas. *AUS (en línea)*, 14, 27-30.
- Alcobendas, a. (2016). *Inauguración del puente 3D en el parque de Castilla La Mancha*. Obtenido de Ayuntamiento de Alcobendas: <https://www.alcobendas.org/es/galeria-fotografica/inauguracion-del-puente-3d-en-el-parque-de-castilla-la-mancha>
- Alba, M. (2023). *La importancia de la comunicación visual en la identidad arquitectónica*. Obtenido de Martin Alba y asociados. Comunicación corporativa integral: <https://martinalba.com/la-importancia-de-la-comunicacion-visual-en-la-identidad-arquitectonica/#:~:text=un%20gran%20impacto,-,El%20Lenguaje%20Visual%20en%20la%20Arquitectura,interactúan%20con%20un%20espacio%20arquitectónico>.
- Andreau, A. (Febrero de 2020). *Diseño Paramétrico y Generativo ¿qué es?*. Obtenido de CEDIM School of Design: <https://blog.cedim.edu.mx/noticias-cedim/→diseno-parametrico-y-generativo-que-es/>
- Apiscor. (2024). *Construction with robotic precision*. Obtenido de apis-cor: <https://apis-cor.com>
- aqso. (2023). *Edificio Temático para la Expo de Yeosu*. Obtenido de aqso.net: <https://aqso.net/es/work/0904tpy-thematic-building-for-the-yeosu-expo>
- Arata, I. (2011). *ArchDaily*. Obtenido de Centro nacional de Convenciones Qatar: <https://www.archdaily.mx/mx/02-295076/centro-nacional-de-convenciones-qatar-arata-isozaki>
- Arquitectura, N. (2023). *Maquetas, maquetas*. Obtenido de Noticias de Arquitectura: <https://noticias.arq.com.mx/Detalles/24049.html>
- Arquitectura, S. (2019). *Arquitectura Mexicana*. Obtenido de Soy Arquitectura, despacho de arquitectos: <https://soyarquitectura.mx/arquitectura/arquitectura-mexicana/>
- Arteaga, J. (2021). *Construcción, un potencial multiplicador de empleos en México*. Obtenido de Forbes México: <https://www.forbes.com.mx/construccion-un-potencial-multiplicador-de-empleos-en-mexico/>
- BCND3D. (2021). *Tipos de impresoras 3D y técnicas de impresión: una rápida visión en conjunto*. Obtenido de BCND3D Fabricante líder mundial de impresión 3D: <https://www.bcn3d.com/es/tipos-de-impresoras-3d-y-tecnicas-de-impresion-una-rapida-vision-en-conjunto/>
- Bellostes. (2008). *Remolinos de madera - swoosh pavilion*. Obtenido de Blog Judit Bellostes: <https://blog.bellostes.com/?p=1334>
- Brian, P. (2023). *Clásicos de Arquitectura: Museo Guggenheim Bilbao/ Frank Gehry*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.archdaily.mx/mx/764294/clasicos-de-arquitectura-museo-guggenheim-bilbao-frank-gehry>
- Burneo, X. (2017). *Desafíos en el presente y futuro de las tecnologías digitales : lo generativo un paradigma en el diseño arquitectónico*. México: Tesis para obtener el grado de Doctor en arquitectura, UNAM.
- DÍNO, I. G. (2012). CREATIVE DESIGN EXPLORATION BY PARAMETRIC GENERATIVE SYSTEMS IN ARCHITECTURE. *METU JFA*, 207-224.
- delinevietnam. (2015). *deline Architecture & Construction*. Obtenido de <https://delinevietnam.wordpress.com/2015/06/22/forest-of-meditation/>
- Díaz, G. (2023). Efímero, abstracto y experimental, así es un pabellón en la arquitectura. *AD magazine*.



- Díaz, G. (2023). Efímero, abstracto y experimental, así es un pabellón en la arquitectura. *AD Magazine*.
- Díaz, G. e. (2021). Aplicaciones del diseño generativo en la ingeniería estructural. *Revista Ingeniería de construcción*, Vol. 36 ISSN 0718-5073.
- DOMAT. (2023). *¿Qué Es El Concreto Y Por Qué Es Esencial En La Construcción?* . Obtenido de DOMAT concrete machinery: <https://domatltada.com/que-es-el-concreto-y-por-que-es-esencial-en-la-construccion/#:~:text=El%20concreto%20es%20un%20material%20de%20construccion%20ampliamente%20utilizado%20que,una%20masa%20sólida%20y%20resistente>.
- Echeverri, P. (noviembre de 2020). *echeverrimontes*. Obtenido de Arquitectura de formas plegadas en estructuras modernas: <https://www.echeverrimontes.com/blog/arquitectura-de-formas-plegadas-en-las-estructuras-modernas>
- Eligemadera. (febrero de 2020). *BIM y Construcción en Madera: El caso del Pabellón BUGA*. Obtenido de eligemadera: <https://eligemadera.com/bim-y-construccion-en-madera/>
- Estrada - Cajigal, V. y. (2005). *Irradiación global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana*. Obtenido de Instituto de Ingeniería UNAM: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>
- Fasoulaki, E. (2008). *Integrated design: generative multi- performative design approach*. Obtenido de MIT Libraries: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/43750>
- Fonseca et al, C. H.-D.-F. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns,. *Journal of Cleaner Production*, 147. 32e335.
- Franco, J. (agosto de 2015). *Arch daily*. Obtenido de Pabellón modular impreso en 3D: sombreadero durante el día, faro durante la noche: <https://www.archdaily.mx/mx/772120/solar-bytes-pavillion>
- Franco, T. (Agosto de 2015). *Pabellón Modular impreso en 3D: sombreadero durante el día, faro durante la noche*. Obtenido de Arch daily: <https://www.archdaily.mx/mx/772120/solar-bytes-pavillion>
- Gang, S. (2015). *Nature Boardwalk at Lincoln park Zoo*. Obtenido de Studio Gang Design: <https://studiogang.com/studio/advocacy>
- García, R. L. (2021.). Diseño paramétrico en Arquitectura: método, técnicas y aplicaciones. *Arquisur revista*, No. 3.
- Granda, Á. (2022). *Propiedades de la Madera III*. Obtenido de f3arquitectura: <https://www.f3arquitectura.es/materiales/propiedades-de-la-madera-iii/>
- Gruss, B. N. (2017). *Mercados emergentes y economías en desarrollo*. Obtenido de IMF BLOG: <https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2017/04/12/emergingmarketsanddevelopingeconomiessustaininggrowthinalessupportiveexternalenvironment>
- Hernández, M. S. (2015). *Vida útil en el diseño sustentable de edificios, Teoría y práctica*. México: Ed. Trillas.
- inarquia. (2023). *Paneles Solares Flexibles: Qué son, Ventajas y Precios*. Obtenido de inarquia paneles: <https://inarquia.es/paneles-solares-flexibles-caracteristicas-ventajas-precios/>



- Innovacion. (2023). *APIS COR*. Obtenido de Innovacion-teconologia: <https://innovacion-teconologia.com/productos/apis-cor-3d/>
- INSST. (2023). *Bienestar térmico global y local*. Obtenido de Herramientas prl.imsst: <https://herramientasprl.insst.es/ergonomia/bienestar-termico-global-y-local>
- Integral. (2019). *¿Qué es un software CAD y para qué sirve?* Obtenido de Integral Innovation Experts: <https://integralplm.com/blog/2019/08/20/que-es-cad/?srsltid=AfmBOor2jfN4yRw9LZYgHwWqs8GrrFdMNsS5L95RjKABgdoxnsV16O4b>
- Kömmerling. (Julio de 2023). *Construcción industrializada: ¿Qué es y qué tipos existen?* Obtenido de Reto Kömmerling: <https://retokommerling.com/construccion-industrializada-que-es-que-tipos-existen/>
- Maluenda, R. (2022). *Qué es un algoritmo informático: características, tipos y ejemplos*. Obtenido de Profile, Madrid: <https://profile.es/blog/que-es-un-algoritmo-informatico/>
- market, 3. (2022). *Photon M3 Max 7K ANYCUBIC*. Obtenido de 3D Market, Impresoras 3D: <https://www.3dmarket.mx/p/photon-m3-max/>
- Martín, J. (2017). Fantasía o realidad, la construcción a través de la impresión 3D. *Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid*.
- Martínez, C. I. (2024). Doctor en Ingeniería en energía UNAM, .
- Martínez, S., Mendoza, & Escobedo, C. (2006). Comportamiento mecánico del concreto fabricado con agregados reciclados. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, ISSN 1405-7743.
- Mayén, C. (Agosto de 2020). *Arquitectura Modular*. Obtenido de JG Arqs.: <https://www.jgarqs.com/blog/2020/8/28/arquitectura-modular>
- Mendel. (2004). *Génético vs Generativo, o de la generación automática de las formas*. México.
- Mera, I. a. (2006). La Dahlia una belleza originaria de México. *Revista Digital Universitaria*, Volumen 7, ISSN: 1067 - 6079.
- Mota-Engil, M. L. (2022). *Instalación Sueños con Fibra/Madera, Tierra/Concreto / Grupo Mota-Engil + MIT Leventhal Center of Advanced Urbanism*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.archdaily.mx/mx/994304/instalacion-suenos-con-fibra-madera-tierra-concreto-grupo-mota-engil-plus-mit-leventhal-center-of-advanced-urbanism>
- Muñoz, M. R. (2023). Desarrollo de mezclas para impresión 3D basadas en cemento portland y adiciones de metacaolín, micro sílice y carbonato. *Ingeniería y Competitividad*, DOI:10.25100/iyc.v25i4.13116.
- Musca, T. (2017). *Arch daily*. Obtenido de Pabellón desmontable evidencia resistencia y adaptabilidad de la madera: <https://www.archdaily.mx/mx/871442/pabellon-modular-se-compone-de-232-piezas-ensambladas-de-madera-meranti>
- Nouvel, A. J. (2006). *ArchDaily*. Obtenido de Centros de exhibición: <https://www.archdaily.mx/mx/915914/museo-de-quai-branly-ateliers-jean-nouvel>
- originalmockup. (2024). *Mockup de las pantallas del iphone 15*. Obtenido de Freepik: https://www.freepik.es/psd-gratis/mockup-pantallas-iphone-15_222044233.htm#fromView=search&page=1&position=4&uuid=0c557915-ae1e-45f7-a28a-aac1fe25e463&from_element=tags_block
- Ortega, L. (2009). El ordenador en el estudio del diseño. En *En la digitalización toma el mando*. (págs. 121-122). Barcelona: Editorial GG.



- Physics. (2024). *Pruebas de módulo de elasticidad*. Obtenido de Industrial Physics: <https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/pruebas-de-modulo-de-elasticidad/#:~:text=El%20módulo%20de%20elasticidad%20de,por%20la%20deformación%20elástica%20resultante>.
- Piker, D. (2017). *Kangaroo Physics*. Obtenido de food4rhino: <https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics>
- PPAA, P. P. (2023). *Pabellón UAVI/PPA*. Obtenido de Archdaily: <https://www.archdaily.mx/mx/1009882/pabellon-uavi-ppaa>
- Quezada, M. (2010). *cursos cl*. Obtenido de Universidad de Chile: https://www.u-cursos.cl/fau/2010/0/DIT-205/1/material_docente/bajar?id_material=456545
- Ranjit, J. (Octubre de 2021). *Bamboo pavilion: Dynamic & Luminous Experiment Woven By LIN Architecture*. Obtenido de Parametric Architecture: <https://parametric-architecture.com/bamboo-pavilion-by-lin-architecture/>
- Remón, R. (2020). *Arquitectura y empresa*. Obtenido de "Rapana" una biblioteca urbana en Varna, Bulgaria: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/rapana-una-biblioteca-urbana-en-varna-bulgaria>
- Rojkind, A. (2022). *ArchDaily X Pavilion / Rojkind Arquitectos + Think Parametric*. Obtenido de ArchDaily: <https://www.archdaily.com/995759/archdaily-x-pavilion-rojkind-arquitectos-plus-think-parametric>
- Roncorini, U. (2007). *Una aplicación de diseño basado en las gramáticas generativas y la vida artificial*. Póntifica Universidad de Perú, Lima: Tesis para optar al título de maestro en ciencias de la computación.
- Santiago, L. (2011). *VORTICA*. Obtenido de cognitive engineering for design: <https://vortica.wordpress.com/2011/08/09/el-diseno-generativo/>
- Sasaki, M. (2005). Flux Structure. Japón: Ed. TotoShuppan.
- Sawant, S. (2024). *Diseño Paramétrico y Computacional: Elevación a través de Algoritmos*. Obtenido de Parametric Architecture: <https://justcrea.com/articulos/nuevas-tecnologias/diseno-parametrico-y-computacional-elevacion-a-traves-de-algoritmos>
- Souza, E. (2020). *¿Cómo impacta el Diseño Generativo en la arquitectura?* Obtenido de ArchDaily: <https://www.archdaily.mx/mx/937716/como-impacta-el-diseno-generativo-en-la-arquitectura>
- Stott, R. (2016). *Compañía china construye el edificio impreso en 3D más alto del mundo*. Obtenido de Arch daily: <https://www.archdaily.mx/mx/761458/compania-china-construye-el-edificio-impreso-en-3d-más-alto-del-mundo>
- Stuttgart. (Octubre de 2019). *El Pabellón de madera BUGA 2019 se convierte en un modelo de la construcción digital en madera*. Obtenido de Madera de Corma: <https://www.madera21.cl/blog/2019/10/04/pabellon-de-madera-buga/>
- Stuttgart, U. (Octubre de 2019). *El Pabellón de Madera BUGA 2019 se convierte en un modelo de la construcción digital en madera*. Obtenido de Madera 21: <https://www.madera21.cl/blog/2019/10/04/pabellon-de-madera-buga/>
- Thet, H. (2023). *Novatr*. Obtenido de The Introductory Guide to Form-finding in Architecture: Getting The Best Building Form With Technology: <https://www.novatr.com/blog/form-finding-in-architecture/#:~:text=Form%2Dfinding%20in%20architecture%20is,stability%2C%20adaptability%2C%20and%20sustainability>



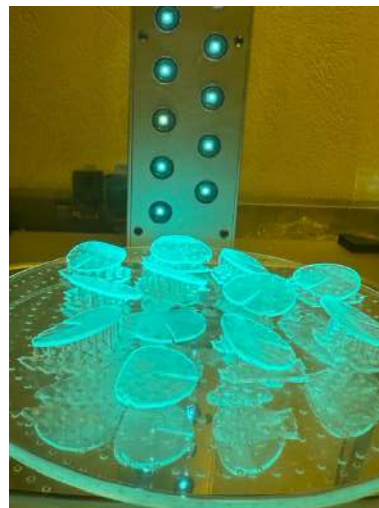
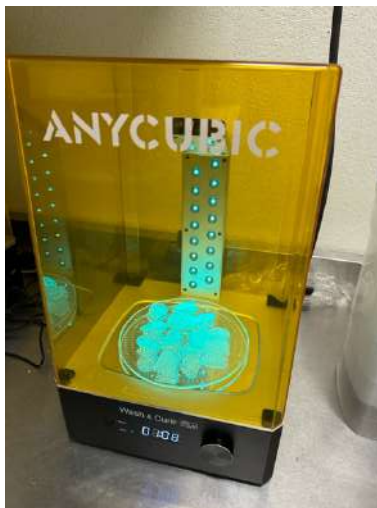
- Thomas. (2017). *Pabellón desmontable evidencia resitencia y adaptabilidad de la madera*. Obtenido de Arch daily: <https://www.archdaily.mx/mx/871442/pabellon-modular-se-compone-de-232-piezas-ensambladas-de-madera-meranti>
- Thomas, O. (enero de 2024). Discovering Computational Design Frontiers at BIG with Oliver Thomas. (iamthestudio, Entrevistador)
- Torres, R. (2016). *Diseño de hormigón para impresión en 3D*. Obtenido de Tesis de máster, Universitat Politècnica de València: <https://riunet.upv.es/handle/10251/67255#>
- Uribe, V. G. (2019). Redefiniendo el concepto de necesidad para un contexto de diseño más sustentable y/o socialmente responsable. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 61-74.
- Valdés, a. (2022). *Panorama internacional de la impresión 3D en concreto*. Obtenido de OECCConsultores: <https://consultoresoec.com/panorama-internacional-de-la-impresion-3d-en-concreto/>
- Velasco, R. (2015). *Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico*. Escuela Técnica Superior de arquitectura. Valencia, España: Tesis de Maestría de la Universidad Politécnica de Valencia .
- Vilchis-Francés et al, A. D.-A. (2015). *Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas*. México: *Agrociencias* 49 (7) 803e820.
- Vilar, I. (2016). *Arch daily*. Obtenido de WATG presenta su diseño de casa impresa en 3D: https://www.archdaily.mx/mx/789748/watgs-urban-architecture-studio-revela-su-diseno-de-casa-impresa-en-3d?ad_campaign=normal-tag
- Villas, B. (1995). Sustainable Development and the Advanced Materials. *Johnson Editor Brasil*, 46- 58.
- Viva, A. (2016). Pasado, presente, Carusi, St. John, Foster, Hebbelink, Ofis. OMA,. *Revista Digital Arquitectura Viva*(110), 45- 62.
- Zafra, P. (Febrero de 2019). *El Pabellón modular diseñado por Nguyen Khac Puoc Architects y Dang + Partners crea una conexión entre las personas, la naturaleza y la arquitectura*. Obtenido de arquitectura y empresa: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/un-pabellon-modular-entre-los-campos-de-te-de-vietnam>
- Zafra, P. (2019). Un Pabellón Modular entre los campos de té de Vietnam. *arquitectura y empresa*.
- Zegarra, T. J. (2015). Esguerramiento en pavimentos de bloques de suelo-cemento: un abordaje experimental. *Ingeniería, investigación y tecnología*.
- Zegarra, T. J.-S.-C. (2015). Esguerramiento en pavimento de bloques de suelo-cemento: un abordaje experimental. *Ingeniería, investigación y tecnología*. vol.16 .
- Zuleta, G. (2011). *Clásicos de Arquitectura: El Pabellón Alemán / Mies Van der Rohe*. Obtenido de Arch daily: <https://www.archdaily.mx/mx/02-69314/clasicos-de-arquitectura-el-pabellon-aleman-mies-van-der-rohe>

Anexos

Nombre	Abreviatura
CAD	Computer- Aided Design
CAM	Computer – Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
CATIA	Computer – Aided Tree dimensional Interactive Application
EPDM	Caucho de polietileno propileno dieno monómero. Impermiabilizar



Resina que se utilizó en la impresión 3D.



Proceso de secado de la piezas.