



UNIVERSIDAD VILLA RICA

ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ARQUITECTURA

“APLICACIÓN DE DIAGRAMAS DE VORONOI
PARA LA GENERACIÓN DE ESPACIOS
ARQUITECTÓNICOS UTILIZANDO
HERRAMIENTAS DIGITALES”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ARQUITECTA

PRESENTA:

NAXHIELI SICARUBE RIVERO VÁZQUEZ

Director de Tesis:

MTRA. EUNICE MARÍA AVID NAVA

Revisor de Tesis

ARQ. LUIS ROMÁN CAMPA PÉREZ

BOCA DEL RÍO, VER.

ABRIL 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a mi familia: mis padres, Laura Vázquez Cortes y Héctor Gilberto Rivero Delfín; mis hermanos, Mariela y Edgar Rivero Vázquez; mi sobrino, Alan Alberto Rivera Rivero y a mi chaparro, Tyson. Gracias por enseñarme los primeros valores que me guiaran durante toda mi vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Contextualización del fenómeno.....	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.2.1. Delimitación del problema	6
1.2.2. Pregunta de investigación	6
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo principal	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Justificación	7
1.4.1. Hipótesis.....	8
1.4.2. Alcances	8
1.4.3. Carácter innovador	9
CAPÍTULO II. Marco Teórico	11
2.1. Marco de referencia histórica	11
2.1.1. Inicio, desarrollo y evolución de las herramientas informáticas aplicadas en la arquitectura.....	13
2.1.1.1. Nacimiento del CAD	13

2.1.1.2. La Comercialización de la computadora personal	16
2.1.1.3. Evolución histórica del Hardware y Software aplicados a la arquitectura	17
2.1.1.4. Años 1960 - 1970	17
2.1.1.5. Años 1970 – 1980.....	18
2.1.1.6. Años 1980 – 1990.....	20
2.1.1.7. Años 1990 – 2000.....	21
2.1.1.8. Años 2000 – 2011.....	25
2.1.2. Línea de tiempo	29
2.2. Marco de referencia teórico – conceptual.....	30
2.2.1. Arquitectura digital	30
2.2.2. Diseño Paramétrico	33
2.2.3. Geometría Computacional.....	35
2.2.3.1. Diagrama de Voronoi.....	36
2.2.3.2. Triangulación de Delaunay	42
2.2.4. Herramientas digitales	44
2.2.4.1. AutoCAD.....	44
2.2.4.2. Rhinoceros 3D.....	45
2.2.4.3. Pointset Reconstruction, plugin para Rhino.....	46
2.2.4.4. Sketchup.....	47
2.2.5. Síntesis de los referentes teóricos.....	49
2.3. Marco de referencia situacional.....	50
2.3.1. Estado del arte	50
2.3.2. Casos análogos.....	53

2.3.2.1. Vertical Village	54
2.3.2.2. Torre Swiss Re	60
2.3.2.3. Terminal de autobús de San Francisco	65
2.3.3. Matriz comparativa	69
CAPÍTULO III. CASO DE APLICACIÓN	70
3.1. Selección de caso de aplicación.....	70
3.2. Selección de terreno.....	72
3.2.1. Ubicación del terreno.....	72
3.2.2. Dimensiones del terreno.....	74
3.2.3. Forma del terreno	76
3.3. Parámetros de diseño.....	77
3.3.1. Vértices del polígono que delimita al terreno.....	77
3.3.2. Numero de particiones.....	79
3.3.3. Tolerancia permisible entre los vértices de Voronoi	80
3.3.4. Criterio de agrupamiento de áreas de Voronoi	81
3.3.5. Altura de los clusters	84
3.4. Desarrollo del proceso creativo	86
CONCLUSIÓN	112
BIBLIOGRAFÍA	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Ejemplo de componentes prediseñados para la constitución de un espacio.....	3
FIGURA 2. Ejemplo en el uso de parámetros en el desarrollo de proyectos.	4
FIGURA 3. Phosphorescence pop music, Alisa Andrasek y Jose Sanchez.....	5
FIGURA 4. La cubierta del MyZeil Shopping Center de Massimiliano Fuksas no habría sido resuelta sin la ayuda de herramientas digitales.....	7
FIGURA 5. Con el uso de herramientas digitales y diseño paramétrico se pueden obtener formas poco convencionales en el área de la construcción.	10
FIGURA 6. Planos realizados con estilógrafos de la casa de la cascada.	12
FIGURA 7. Uso del Sketchpad.....	14
FIGURA 8. IBM PC comercializada en 1981	16
FIGURA 9. Curvas complejas del Guggenheim introducidas a CATIA como mallas tridimensionales	23
FIGURA 10. Antes de iniciar el proceso de diseño, RoTo utiliza el software para extraer de un proyecto su información más objetiva.	25
FIGURA 11. El concepto BIM engloba la gestión de toda la información que se genera a lo largo del proceso de proyecto, desde la fase de diseño conceptual, el anteproyecto y la toma de decisiones constructivas hasta las fases más avanzadas e incluso demolición.....	27

FIGURA 12. El proceso de diseño y construcción del Guggenheim de Bilbao se hizo posible gracias al uso de herramientas digitales.	31
FIGURA 13. Transarquitectura de Marcos Novak.....	33
FIGURA 14. El arquitecto controla todas las etapas del proceso de diseño.	35
FIGURA 15. Ejemplos de diagramas de Voronoi encontrados en la naturaleza ...	36
FIGURA 16. Distintas formas de diagramas de Voronoi de acuerdo a la ubicación de los puntos de control en un espacio delimitado.....	37
FIGURA 17. Proceso de obtención de un diagrama de Voronoi mediante la expansión de círculos	38
FIGURA 18. Conjunto de puntos inicial.....	39
FIGURA 19. Unión correcta de puntos cercanos.	40
FIGURA 20. Proyección de mediatrices.....	40
FIGURA 21. La intersección de las perpendiculares delimitara la región que le corresponde a cada uno de los puntos.	41
FIGURA 22. Partes de un diagrama de Voronoi	41
FIGURA 23. Comprobación de la condición de Delaunay	42
FIGURA 24. Relación entre la triangulación de Delaunay y el diagrama de Voronoi	43
FIGURA 25. Autocad como herramienta de dibujo	45
FIGURA 26. Modelado de una superficie paramétrica en el programa.....	46
FIGURA 27. Diagrama de Voronoi creado en Rhino con el pointset reconstruction plugin	47
FIGURA 28. Sketchup permite georeferenciar el modelo y visualizar asoleamientos en tiempo real	48
FIGURA 29. Casa danzante, Frank Gehry.....	50
FIGURA 30. Swiss Re Tower, Norman Foster.	51
FIGURA 31. Swells, Alisa Andrasek	52
FIGURA 32. Vertical Village	54
FIGURA 33. El principal objetivo es ocupar el menor espacio posible de terreno	55
FIGURA 34. Proceso de diseño	56

FIGURA 35. Diferentes tipos de vivienda dentro del edificio.....	57
FIGURA 36. Estructura y corte.....	58
FIGURA 37. Render interior y maqueta.	59
FIGURA 38. Torre Swiss Re	60
FIGURA 39. La geometría del proyecto es controlada y compartida por una hoja de cálculo de Excel, la cual es ligada al programa para generar la forma visual y apreciar las modificaciones	61
FIGURA 40. Modificando datos simples en la hoja de Excel como: alto, ancho, diámetro y otros parámetros similares, se puede apreciar inmediatamente el perfil recalculado del edificio.....	62
FIGURA 41. Planta de conjunto	63
FIGURA 42. Fachada.....	64
FIGURA 43. Fachada Watercube	65
FIGURA 44. Tetracaidecaedro (izquierda); Dodecaedro pentagonal irregular (derecha); Cluster base Weaire-Phelan	66
FIGURA 45. Seccionamiento del cluster Weaire-Phelan	67
FIGURA 46. Proceso analítico sobre el comportamiento de la forma resultante. .	67
FIGURA 47. El resultado es una estructura de árbol con un modelo de celular que se abre al cielo permitiendo el paso de la luz solar dirigiendo a los visitantes a vistas específicas.....	68
FIGURA 48. El proyecto de una terminal de autobuses en San Francisco es resultado de una investigación sobre diseño paramétrico y algoritmos de Voronoi.	71
FIGURA 49. El terreno (rojo) se ubica dentro de un corredor comercial (amarillo)	73
FIGURA 50. Ubicación del terreno.....	74
FIGURA 51. Dimensiones del terreno.....	75
FIGURA 52. Divisiones de Voronoi de un terreno regular (izquierda) y un terreno irregular (derecha) obtenidas a partir de sus vértices.	76
FIGURA 53. Vértices que delimitan el polígono del terreno.....	78

FIGURA 54. El número de particiones corresponde a la cantidad de puntos ubicados dentro del terreno.....	79
FIGURA 55. Los vértices de Voronoi que presenten una separación menor a 10 metros se descartan.....	81
FIGURA 56. Representación de clusters (3 o más puntos cercanos) y las cadenas que forman los pasillos de interconexión de espacios	82
FIGURA 57. Agrupaciones resultantes a partir de la utilización de parámetros de 10 y 15 respectivamente.	83
FIGURA 58. Agrupaciones resultantes a partir de la utilización de parámetros de 19 y 20 respectivamente.	84
FIGURA 59. El valor de la altura también sirve para determinar la superficie interna del cluster.....	85
FIGURA 60. Con los vértices que limitan el polígono del terreno se puede saber su influencia dentro de la geometría del mismo.....	86
FIGURA 61. Principales áreas de influencia dentro del polígono del terreno	87
FIGURA 62. Áreas donde posteriormente se ubicaran los accesos	88
FIGURA 63. Las áreas de Voronoi que producen las personas son dependientes de una actividad y momento determinado	89
FIGURA 64. Mediante la inserción aleatoria de puntos se consiguen distribuir 500 de ellos en el total del terreno de una manera homogénea	91
FIGURA 65. Áreas utilizables para la distribución de espacios y cubierta del proyecto	92
FIGURA 66. Distancias menores a 20 m dentro del polígono.....	93
FIGURA 67. Grupos (a) y Trayectorias (b) localizados dentro del polígono	93
FIGURA 68. En <i>AutoCAD</i> se resaltan los grupos localizados.....	94
FIGURA 69. Planta de distribución de locales, pasillos y estacionamiento.....	95
FIGURA 70. Proceso constructivo de la maqueta exploratoria de la cubierta.....	96
FIGURA 71. Producto final de la maqueta exploratoria.	96
FIGURA 72. Diagrama de Voronoi a partir de la segmentación del área de circulación.	97

FIGURA 73. Render de la modulación de la cubierta.	98
FIGURA 74. Render de la modulación del piso.....	99
FIGURA 75. Planta de distribución con cubierta.	99
FIGURA 76. Representación tridimensional del crecimiento de vértices de Voronoi.	100
FIGURA 77. Método geométrico para calcular las alturas de los locales.....	101
FIGURA 78. Construcción tridimensional de locales.....	102
FIGURA 79. Conjunto de locales.	102
FIGURA 80. Conjunto de locales con cubierta y pasillo.	103
FIGURA 81. Plano Arquitectónico ARQ-1: Plantas Nivel 1 y Nivel 2	104
FIGURA 82. Plano Arquitectónico ARQ-2: Plantas de conjunto y azoteas.	105
FIGURA 83. Plano Arquitectónico ARQ-3: Cortes y Alzados.....	106
FIGURA 84. Plano Arquitectónico ARQ-4: Trazo de poligonal del cluster E	107
FIGURA 85. Perspectiva.....	108
FIGURA 86. Perspectiva.....	108
FIGURA 87. Perspectiva	109
FIGURA 88. Perspectiva	109
FIGURA 89. Maqueta final vista en planta.	110
FIGURA 90. Vista de maqueta en el contexto.....	110
FIGURA 91. Vista en el contexto.	111
FIGURA 92. Vista en el contexto.	111
FIGURA 93. Diversos resultados de escenarios experimentando con método Voronoi.....	113
FIGURA 94. Render final del proyecto.....	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Longitud de pasillos principales de centros comerciales en Veracruz. ...	80
Tabla 2. Total de puntos por zonas.....	90

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, con los avances que se han dado en la tecnología, se pueden desarrollar y observar modelos que permiten diversas maneras de imitar el comportamiento de la naturaleza, que van desde las partículas elementales a nivel atómico hasta los grandes eventos que genera el universo.

Estas mismas tecnologías que ayudaron a obtener nuevos descubrimientos auxilian a entender la manera en que se comporta y se estructura la naturaleza, surgiendo nuevas maneras de imitarla para lograr un nivel muy aproximado a generar comportamientos o configuraciones naturales.

Los arquitectos actualmente tienen mejores herramientas para encontrar formulas que permiten crear formas en base a las reglas que rigen a la naturaleza. Su uso no se limita únicamente para la visualización de un proyecto, si no que ayudan a generarlo, creándolo a un nivel arquitectónico mas holístico, donde el arquitecto es capaz de ver las cosas en conjunto antes de que estén hechas y puede ir no solo recreando sino generando formas con técnicas programables que producen resultados similares a los que se encuentran en la naturaleza. La tarea de introducir parámetros a rutinas preestablecidas permite tener un mayor avance creativo en un menor tiempo, con errores más puntuales para detectar y corregir o simplemente seguir experimentando hasta alcanzar un mejor resultado.

CAPÍTULO I. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL FENÓMENO

Cuando en 1997 se inauguró el museo Guggenheim Bilbao en España, Frank Gehry posicionó a la tecnología digital en un lugar clave dentro de la arquitectura, que marcaría una nueva etapa en la cual, lejos de intentar crear un nuevo estilo, la tecnología aplicada en la arquitectura permite una nueva forma de pensar y diseñar.

La arquitectura digital experimental no intenta romper con las formas clásicas de la arquitectura moderna, sino que se olvida de ellas. No es una arquitectura irónica, agresiva o crítica, su premisa inicial es una serie de variables establecidas por el arquitecto, que mediante herramientas digitales, generan un universo de formas complejas que construyen un distinto modo de aproximación al espacio arquitectónico.

Dentro de todos los temas posibles a discutir sobre el uso de los medios digitales en la arquitectura, se pueden mencionar dos vertientes:

El primero es la reformulación en los procesos productivos, que permiten obtener la concepción del diseño y el desarrollo de componentes, sin importar la igualdad o variedad en las piezas que lo constituyen y que al mismo tiempo sean eficientes.

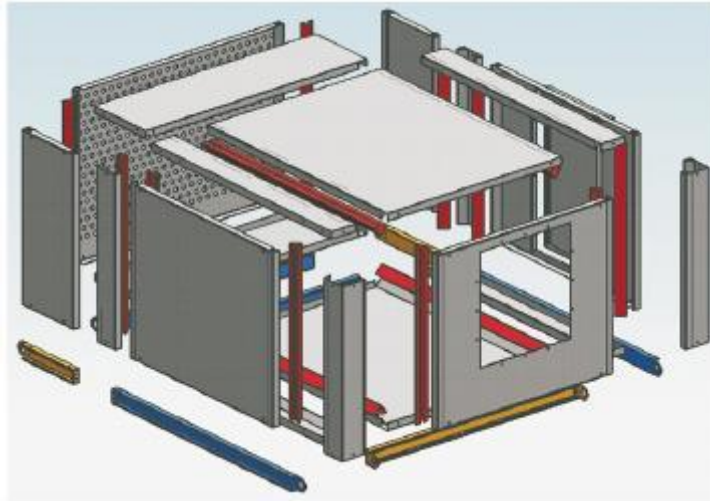


FIGURA 1. Ejemplo de componentes prediseñados para la constitución de un espacio.

El segundo aspecto a considerar es que mediante el uso, de vínculos y parámetros en el desarrollo de proyectos se pueden utilizar diferentes software o sistemas de la misma programación, lográndose obtener de manera más eficiente las respuestas a distintas variaciones de estos valores, que relacionados entre sí, repercuten en la generación de diversos escenarios.

Estos dos aspectos, que pueden parecer distantes entre sí, tienen cada uno: la posibilidad de generar una mayor libertad formal a los arquitectos para responder a formas no convencionales y complejas.

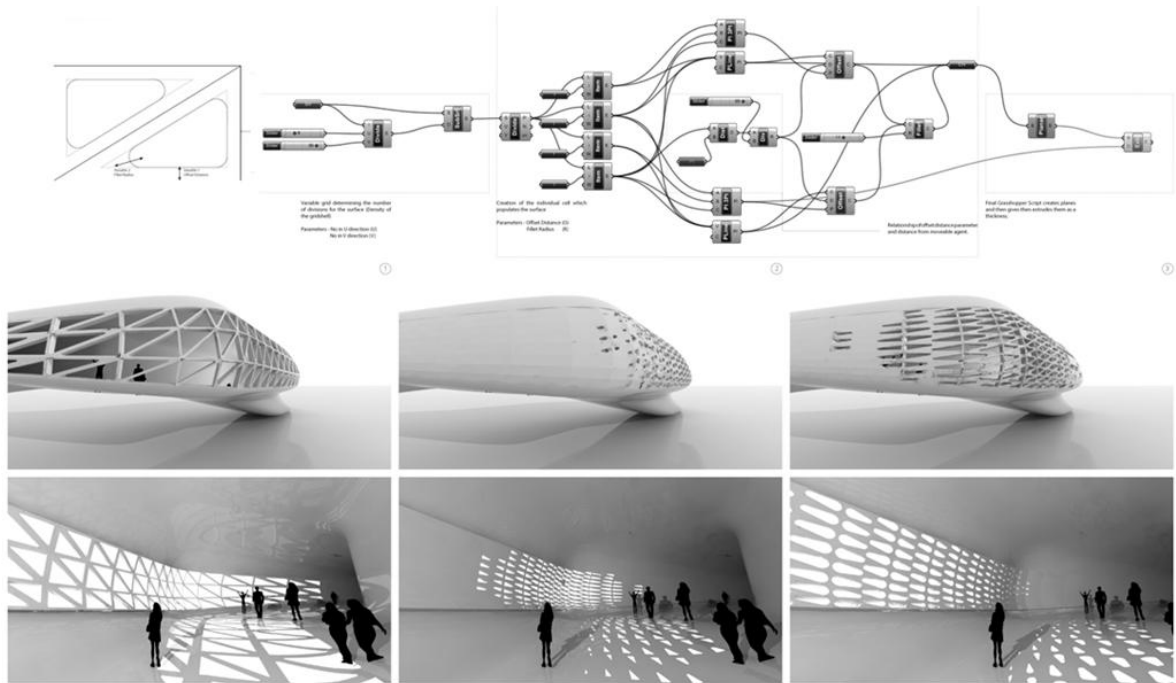


FIGURA 2. Ejemplo en el uso de parámetros en el desarrollo de proyectos.

En la actualidad es poco común encontrar diseños basados en temas matemáticos o computacionales, en su lugar existe el diseño tradicional, auxiliado por la tecnología para la visualización de la forma y en la elaboración de planos. Sin embargo, esta tendencia poco a poco se está generalizando y existen propuestas interesantes, que brindan nuevas soluciones a problemáticas más complejas de temas comunes, como es el caso de la configuración de espacios, donde las formas resultantes son una respuesta única a las variables analizadas.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo informático y los recursos electrónicos de última generación, finalmente han alcanzado al territorio del diseño arquitectónico, permitiendo formular, comprender y visualizar ideas complejas que hasta hace unos años,

podían ser expuestas únicamente mediante dibujos y esquemas limitados a las capacidades representativas del arquitecto.

Gracias al avance de las computadoras se pueden obtener formas que se asemejan más a la naturaleza a partir de procesos de diseño que se rigen por la modificación de parámetros y variables.

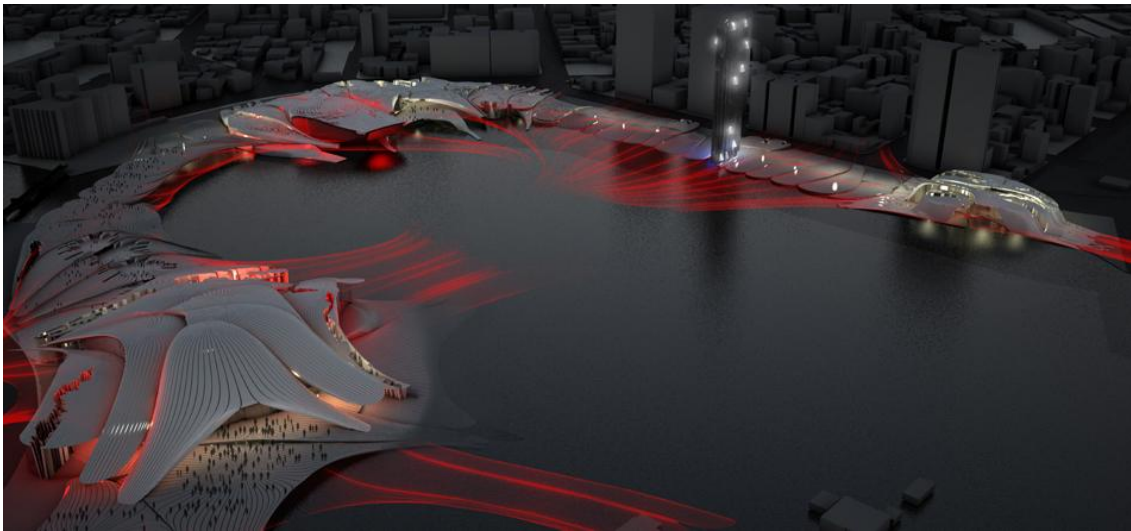


FIGURA 3. Phosphorescence pop music, Alisa Andrasek y Jose Sanchez

Debido al desconocimiento de las nuevas técnicas y en algunos el rechazo a utilizarlas. El proceso de diseño tradicional utilizado para espacios arquitectónicos aprovecha limitadamente los recursos que puede ofrecer el uso de la tecnología contemporánea.

1.2.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La falta de aprovechamiento generalizado para la solución de espacios con formas variables y complejas con métodos y herramientas digitales, han limitado el beneficio que se puede obtener de ellas, en la etapa generativa de proyectos arquitectónicos.

1.2.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo pueden las herramientas digitales usarse para diseñar un método que genere espacios arquitectónicos?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Se demostrará que mediante herramientas digitales y la utilización de diagramas Voronoi, se pueden diseñar espacios arquitectónicos a partir de la manipulación de una serie de variables preestablecidas por el diseñador.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recolectar información acerca del uso de la informática en el diseño arquitectónico y su evolución a través del tiempo.
2. Investigar casos análogos en México, en caso de existir, y en el resto del mundo de arquitectura paramétrica o digital.
3. Ubicar un predio de forma irregular en la zona de Veracruz-Boca del Río con las características morfológicas adecuadas.
4. Generar un método de diseño que delimite espacios arquitectónicos a partir de variables y parámetros.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En la sociedad actual se vive un constante crecimiento tecnológico que ha pasado de ser de algo utilizado solo por unos pocos, a formar parte de la mayoría. Es común que los individuos en una ciudad se encuentren familiarizados con los avances electrónicos y obtengan los beneficios y comodidades que estos ofrecen. Dichos aparatos, cada año se van haciendo más complejos e incorporan mejoras que ayudan a cubrir un mayor número de aplicaciones y funciones.

De igual manera los arquitectos están proyectando cada vez más, con herramientas tecnológicas de última generación como son las computadoras personales, tabletas, celulares inteligentes, etc. que sirven de eslabón entre el papel y la construcción del proyecto. Estas herramientas son fundamentales ya que contribuyen a solucionar problemáticas cada vez más complejas, con una mayor exactitud y en un menor tiempo.



FIGURA 4. La cubierta del MyZeil Shopping Center de Massimiliano Fuksas no habría sido resuelta sin la ayuda de herramientas digitales.

El uso de las computadoras y programas abunda en las etapas de documentación del proyecto, incluyendo las perspectivas y recorridos virtuales; dejando el papel que puede jugar en la etapa generativa del proyecto en segundo plano. No se trata de que la tecnología resuelva automáticamente la arquitectura, se trata de utilizar de manera eficiente las herramientas digitales actuales formulando métodos digitales que ayuden a reducir el tiempo en la solución de problemas de diseño, que si se hicieran con métodos manuales parecerían difíciles de realizar.

Gracias al desarrollo informático, tecnologías avanzadas, software y recursos electrónicos de última generación, el diseño arquitectónico se está alojando en un ámbito digital de hipermedios lo suficientemente evolucionados que incluso permiten la visualización virtual de proyectos aún no ejecutados, logrando identificar el concepto global en cada diseño.

1.4.1. HIPÓTESIS

Mediante el uso de la geometría computacional que se obtiene con los diagramas Voronoi, se puede crear un método para generar arquitectura paramétrica.

1.4.2. ALCANCES

La formulación paso por paso de un proceso creativo de diseño paramétrico que dé como resultado un objeto arquitectónico. Proporcionando la información que lo respalde, el método de diseño, explicar los parámetros utilizados, su función, justificación y relación en un caso de aplicación, el cual incluye planos arquitectónicos y criterio estructural para su mejor comprensión.

También se elaboran maquetas de trabajo y de presentación a escala y un modelo virtual en 3d, el cual se utiliza para la elaboración de perspectivas (*renders*) de las áreas que comprenden el proyecto.

1.4.3. CARÁCTER INNOVADOR

Con el uso de software se puede visualizar el diseño, obteniendo beneficios como los que se mencionan a continuación:

1. Se pueden generar espacios inteligentes y responsivos estableciendo un criterio de diseño (exploración de formas), permitiendo adaptarse a cualquier situación, contexto, etc. Es decir, se puede adaptar el diseño a cualquier parámetro que sea integrado al proceso de diseño, dando un resultado que logra satisfacer un problema específico.
2. Provoca la asociación entre disciplinas, la cual permite integrar criterios estructurales, sociales, simulaciones de flujo, etc. Con la finalidad de que el modelo tridimensional no sea solo una maqueta virtual sino una herramienta capaz de darnos resultados e información para lograr diseños más aterrizados que proponen resultados contundentes.
3. Posibilidad de relacionar distintas variables y parámetros; teniendo un proceso de diseño y no una forma preestablecida se pueden manipular sus variables y propiedades, las cuales podemos modificar en tiempo real y así comparar resultados, con la finalidad de tener un resultado más eficiente.
4. Permite integrar la fabricación digital directamente al diseño, ya que se integra la producción digital por medio de máquinas de control numérico o impresoras 3D.

Estos beneficios se experimentaron por su carácter innovador desde el proceso de la construcción de espacios hasta la concepción de la forma, mediante el uso de la computadora con diversas variables, ya sean predeterminadas o aleatorias, pudiendo así escoger la más adecuada para el proyecto, logrando obtener una partición en el terreno única en este caso con los parámetros seleccionados. Logrando con este sistema reducir el tiempo en comparación con la innovación de las formas.

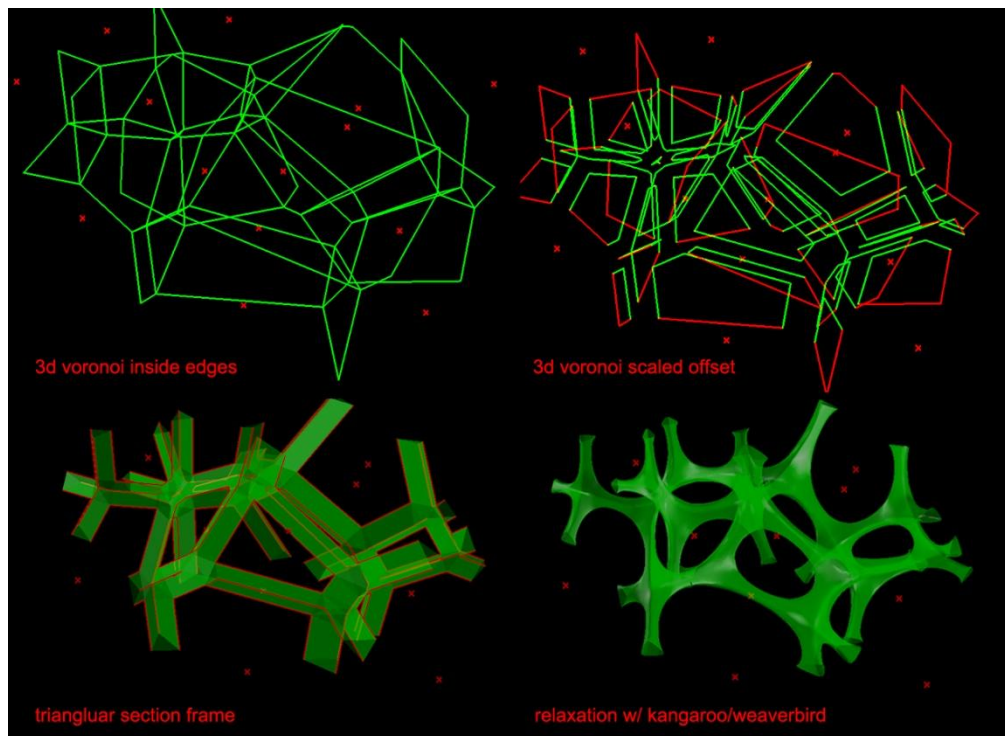


FIGURA 5. Con el uso de herramientas digitales y diseño paramétrico se pueden obtener formas poco convencionales en el área de la construcción.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO DE REFERENCIA HISTÓRICA

“Nuestra época fija cada día su estilo. Nuestros ojos, desgraciadamente, no saben discernirlo aún”,¹ afirmaba Le Corbusier en su momento cuando se propuso a darle forma y significado a la arquitectura en la era industrial, sin embargo, el estudio de los antecedentes históricos de la arquitectura digital, su desarrollo y situación actual, todavía no han sido realizados de manera exhaustiva y sistemática. Sólo se tienen estudios muy puntuales o síntesis que no profundizan mucho acerca de las consecuencias trae consigo.

Hace tan sólo 25 años, casi todos los dibujos se ejecutaban utilizando lápiz y papel. Cuando se precisaba realizar cambios, era necesario borrar y volver a dibujar. Si el cambio era importante, se repetía el dibujo por completo. Si un cambio afectaba a otros documentos se tenía que buscar a mano en cada uno de ellos y modificarlos.

¹ Le Corbusier. *Hacia una Arquitectura*, Barcelona, Apóstrofe, 1958, p. 23.

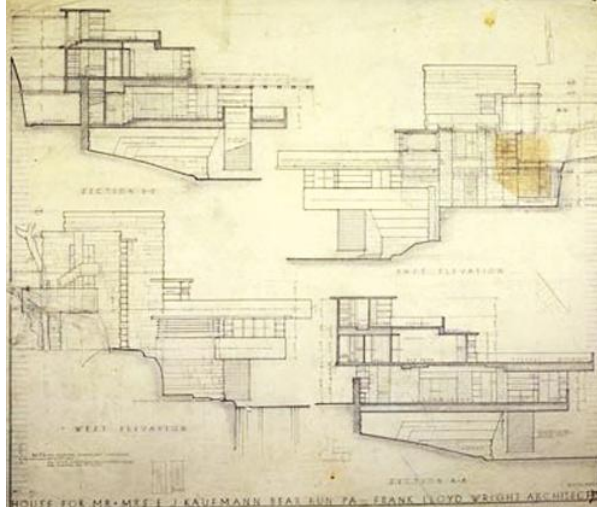


FIGURA 6. Planos realizados con estilógrafos de la casa de la cascada.

La labor del diseño denota un proceso, lo cual incluye determinar una situación y concebir una solución, analizar y desarrollar un proyecto muy detallado, y producir la adecuada documentación.

El proceso de generación de ideas arquitectónicas y su posterior representación gráfica, con el fin de comunicar el proyecto a quienes deben construir el edificio, está sufriendo una transformación como consecuencia de la aparición de la informática aplicada a la arquitectura.

En términos arquitectónicos, muchos autores afirman que las ideas propuestas por el Deconstructivismo constituyen el precedente histórico más inmediato para algunos de los arquitectos que han experimentado con herramientas digitales.²

Con la experimentación de estas herramientas digitales, surgen competencias internacionales como: La Casa Virtual de 1997, donde el concepto se empieza a

² Novak, Marcos. (s.f.) ZeichenBau : Virtualités réelles. Recuperado el 5 de octubre de 2011, de <http://www.archilab.org/public/2000/catalog/novak/novaken.htm>

encaminar hacia una arquitectura hecha para el ciberespacio, la cual puede ocupar tecnologías de realidad virtual inmersiva o no.

Este desarrollo en la arquitectura se dio por el avance de las herramientas digitales por lo que en este apartado se realizara una presentación cronológica de evolución en las herramientas informáticas y su incursión en la labor arquitectónica.

2.1.1. INICIO, DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS APLICADAS EN LA ARQUITECTURA

2.1.1.1. NACIMIENTO DEL CAD

El primer software para dibujar por computadora surge en los años 50 para las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos, el SAGE (Semi Automatic Ground Environment) un sistema de defensa aérea. Fue empleado para visualizar datos de radar y desarrollado en colaboración con el Massachusetts Institute of Technology (MIT); sin embargo, no fue sino hasta 1962 cuando Ivan Sutherland, también en el (MIT), escribió el primer programa capaz de dibujar una línea en una pantalla de rayos catódicos llamado *Sketchpad*. Se trataba de un sistema gráfico, creado mucho antes que el término interfaz gráfica fuera concebido, utilizando un lápiz óptico, inventado el año anterior, para introducir formas a la computadora que, junto con la pantalla y una serie de interruptores conformaban la interfaz.³

³ Sutherland, Ivan Edward. *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*. Technical Report No. 296, Cambridge, University of Cambridge, 2003. p. 9.

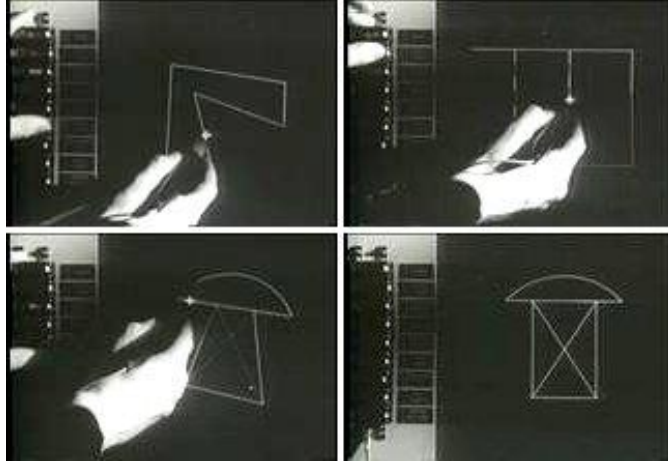


FIGURA 7. Uso del Sketchpad.

Las primeras aplicaciones de computadora en la arquitectura no pertenecieron al campo gráfico, sino que se centraron en la solución de problemas de tipo compositivo a partir de la potencia de cálculo de la computadora. Arquitectos como Christopher Alexander pensaron que determinando todos los parámetros de una situación compleja, e introduciéndoles adecuadamente al computador éste encontraría la solución óptima y más económica.⁴

Estos planteamientos optimistas no eran reales con las posibilidades que nos dan las computadoras, además de erróneas en su concepción. La computadora no puede reemplazar al arquitecto, simplemente es un instrumento que le facilita su labor, proporcionándole los resultados de cálculos previamente establecidos.

El furor de la nueva herramienta tecnológica se iba desvaneciendo a consecuencia de las limitaciones técnicas que presentaba y la gran inversión que había de realizarse, dejando una cierta sensación de desilusión sobre la verdadera

⁴ Michitaka, Hirose. *Human-computer interaction : INTERACT '01*, Amsterdam, IOS Press, 2001. pp. 350 -352

capacidad de las computadoras, la cual se arraigó con fuerza entre los arquitectos que preferían ocupar sus métodos tradicionales para el diseño.

Con el pasar de los años, las capacidades gráficas de las computadoras aumentaron. Al principio se consideró como un mismo producto a la computadora, el sistema operativo y el conjunto de programas o aplicaciones. Una misma empresa desarrollaba, instalaba y mantenía las tres cosas, dando lugar a una filosofía de ventas de gran éxito. Este método vinculaba para siempre a los clientes con un único fabricante. El costo de estos sistemas era excesivo para una implantación generalizada en la arquitectura, por lo que los arquitectos no entraban dentro del tipo de clientes de estos fabricantes. Sólo el diseño dedicado a la producción industrial era atendido por estas empresas, siendo este el principal causante de que la informática gráfica para la arquitectura sea un derivado de los desarrollos pensados para otros campos de actividad o una adaptación de programas genéricos de dibujo plano o de diseño en tres dimensiones.

El uso de programas genéricos se hacía cada vez más difícil. Un programa para dibujar en dos dimensiones (2D) requiere pocas opciones especiales para la arquitectura, es decir, un mismo programa de dibujo puede ser utilizado en distintas disciplinas. Sin embargo un programa de diseño en tres dimensiones (3D) necesita una especialización más decidida y compleja que difícilmente se encontraría fuera de la arquitectura, por ejemplo, la necesidad de calcular perspectivas y sombras. Las universidades británicas con los recursos disponibles fueron las que iniciaron la generación de los primeros programas específicos para arquitectura, pero desafortunadamente no estaban al alcance de la mayoría de los arquitectos.

No fue sino hasta la aparición de la computadora personal de IBM que el software pudo difundirse más allá de las universidades y reinventarse a consecuencia del nuevo mercado creado.

2.1.1.2. LA COMERCIALIZACIÓN DE LA COMPUTADORA PERSONAL

Con la aparición de la primera computadora personal (Personal Computer o simplemente PC). Gracias los menores costos y aumento significativamente en sus prestaciones, las PC se convirtieron en máquinas accesibles y asequibles para el trabajo de los arquitectos.



FIGURA 8. IBM PC comercializada en 1981

Tenemos como ejemplos la IBM 360 de 1964, la IBM 370 a mediados de 1970 y finalmente con la invención de los microprocesadores y con el concepto de compatibilidad iniciado con Apple surge el boom de ventas de estos equipos en 1981, actualmente gran cantidad de fabricantes producen modelos de funcionamiento casi idéntico, o "compatible", lo cual ha convertido al PC en un estándar. La compatibilidad, la creciente cantidad de fabricantes y la aparición de diseñadores de programas independientes permitieron la comercialización de gran cantidad de programas de todo tipo.

Fue hasta mediados de los ochenta que finalmente se podía afirmar que el dibujo asistido por computadora podía ser utilizado por un profesional, tanto por las prestaciones del sistema como por su accesibilidad.

2.1.1.3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL HARDWARE Y SOFTWARE APLICADOS A LA ARQUITECTURA

Los usos y alcances que se han obtenido a través de herramientas digitales en la arquitectura, han variado considerablemente en las últimas décadas. Diversos factores han influido en el uso de las computadoras en la arquitectura entre ellos lo económico, la compatibilidad, la asequibilidad tecnológica, la competencia, etc.

Para poder medir el desempeño computacional a lo largo de los años se puede usar como medida las Operaciones de punto flotante por segundo (FLOPS) este término lo utilizaremos para entender como se ha ido progresando en el tiempo relacionándolo con el costo.

A continuación se sintetizan los eventos relevantes al caso de estudio, agrupados por lapsos de 10 años.

2.1.1.4. AÑOS 1960 - 1970

En los 60, los sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus términos en inglés) se utilizaron para diseñar espacios interiores de oficinas. En 1968 estaban ya disponibles los sistemas CAD 2D (muy básico, tal y como lo entendemos hoy en día). Estos sistemas funcionaban en terminales de grandes ordenadores (mainframes) y era software hecho a la medida por parte del fabricante.

Durante los primeros años de la era de la computadora, el software se contemplaba como un añadido. El desarrollo del software se realizaba virtualmente sin ninguna planificación, se diseñaba a medida para cada aplicación y tenía una distribución relativamente pequeña, siendo utilizada por la misma persona que lo hacía, o bien, la organización a la cual pertenecía. Este usuario/programador, lo escribía, lo ejecutaba y, si fallaba, lo depuraba. Debido a este entorno personalizado del software, el diseño era un proceso implícito, realizado en la mente de alguien y la documentación normalmente no existía.

Para alcanzar un GFLOP (un millón de FLOPS) con la tecnología que se usaba hacia 1961 se necesitaría un equipo que costara un millón de millones de dólares.⁵

2.1.1.5. AÑOS 1970 – 1980

La segunda era en la evolución de los sistemas de computadora se extienden desde la mitad de la década de los sesenta hasta finales de los setenta. La multiprogramación y los sistemas multiusuario introdujeron nuevos conceptos de interacción hombre - máquina. Las técnicas interactivas abrieron un nuevo mundo de aplicaciones y nuevos niveles de sofisticación del hardware y del software. Los sistemas de tiempo real podían recoger, analizar y transformar datos de múltiples fuentes, controlando así los procesos y produciendo salidas en milisegundos en lugar de minutos.

⁵ IBM 1401 Data Processing System. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://ed-thelen.org/comp-hist/BRL61-ibm1401.html>

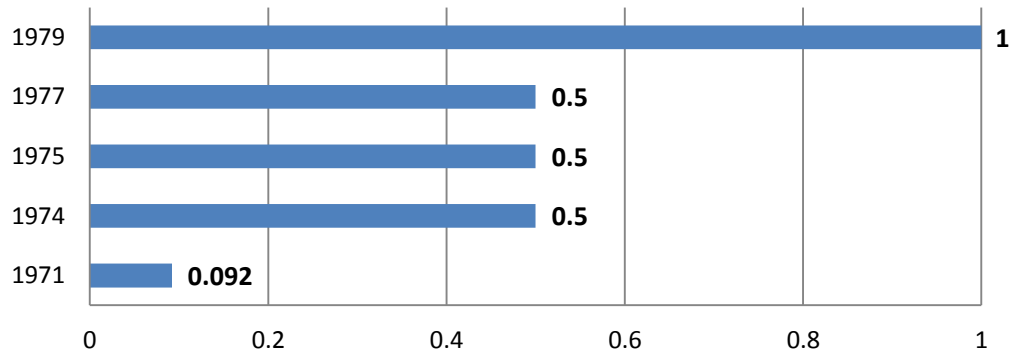


GRÁFICO 1. Capacidad en MIPS (Millones de Instrucciones por segundo) de los microprocesadores de las computadoras entre los años 1970 – 1980⁶

La segunda era se caracterizó por la integración de los pioneros de la industria, el gobierno y las universidades para el desarrollo, la fabricación y la producción de los paquetes de software y con esto dieron acceso a una gran cantidad de usuarios.

A principios de esta década varias compañías empezaron a ofrecer sistemas de diseño/dibujo automatizado. Muchos de los productos y firmas más conocidas en la actualidad tuvieron sus inicios en este periodo. Uno de los más famosos programas CAD en 2D, era el CADAM (Computer Augmented Drafting and Manufacturing) originalmente fabricado por la compañía aérea Lockheed. En 1975 la compañía francesa aeroespacial, Avions Marcel Dassault, adquirió una licencia del código fuente de CADAM propiedad de Lockheed y en 1977 comenzó a desarrollar un programa de CAD 3D llamado CATIA (Computed Aided Three Dimensional Interactive Application), el cual más adelante vendría a revolucionar el papel de la computadora en la construcción de la arquitectura.

⁶ Computer Speed Claims 1980 to 1996. Recuperado el 17 de abril de 2012, de <http://www.roylongbottom.org.uk/mips.htm>

2.1.1.6. AÑOS 1980 – 1990

La computadora personal se convierte en una herramienta accesible y reconocida por el consumidor, llegando a ser de uso común durante los años 80. Esto se debió a la producción en masa de microprocesadores compatibles con la PC de IBM y el soporte de las múltiples aplicaciones que harían su aparición en esta década.

Gracias a programas más complejos en su ejecución pero simplificados en su modo de uso, los usuarios ya no requerían ser técnicos, en contraste con las microcomputadoras de la primera generación que vinieron como kits y requirieron a menudo habilidades en electrónica.

Para el año de 1984 el costo por GFLOP disminuye a USD \$15,000,000.⁷

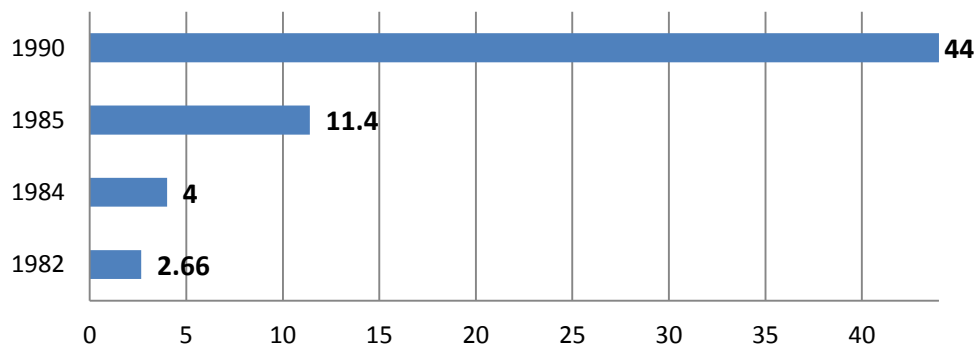


GRÁFICO 2. Capacidad en MIPS (Millones de Instrucciones por segundo) de los microprocesadores de las computadoras entre los años 1980 – 1990⁸

⁷ The CRAY X-MP Series of computer systems. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://archive.computerhistory.org/resources/text/Cray/Cray.X-MP.1985.102646183.pdf>

⁸ *op. Cit.* 4

En 1982 se funda Autodesk con el propósito de producir un programa CAD para PC con un costo inferior a los \$1,000 dólares (a finales de los años 70 el precio de los sistemas CAD rondaba los \$125,000 dólares) surgiendo finalmente AutoCAD, un software accesible que permitía hacer dibujos técnicos detallados e incluía un lenguaje de programación sencillo, denominado AutoLisp, para la creación e rutinas personalizadas por el usuario. Con estas características, el programa pronto se volvió muy popular entre los arquitectos y rápidamente se fue adoptando en grandes despachos de arquitectura.

Dos años más tarde surge un fuerte competidor al AutoCAD, el Microstation desarrollado por Bentley Systems, saliendo al mercado al trasladar su experiencia en programas ejecutados en mainframes pero poco podía competir en precio ya que costaba alrededor de \$5,000 dolares.

En esta década es cuando también surge Archicad, desarrollado por la empresa húngara Graphisoft, como un software que proporcionara de manera integral dibujos tanto en 2D como en 3D para la labor arquitectónica.

2.1.1.7. AÑOS 1990 – 2000

A principios de los años 90, la capacidad de las computadoras iba en crecimiento y se consolidaban los espacios gráficos de trabajo, en lugar de pantallas monocromáticas con datos introducidos en forma de texto, el uso de íconos facilitaba la tarea a quien quería hacer uso de aplicaciones sin necesidad de tener conocimientos informáticos.

En 1993, un grupo de ingenieros forman un equipo con el objetivo de producir un programa de CAD en 3D que no necesitara de un equipo costoso para operar: Solidworks, un software de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows, intuitivo, fácil de manejar y con una filosofía de

trabajo que permite plasmar ideas de una forma rápida y sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas.

Autodesk por su parte toma una estrategia distinta, en lugar de agregar una funcionalidad 3D al AutoCAD, prefiere introducir un programa independiente para este fin: el 3D Studio, el cual también incluiría animación 3D y una arquitectura basada en plugins que ampliaría rápidamente el grupo inicial de herramientas que contenía el programa, permitiendo a programadores y a usuarios avanzados, programar herramientas y funcionalidades personalizadas dentro del programa.

Mientras tanto en el campo de la arquitectura, los programas eran usados mayormente en el proceso de documentación del proyecto, es decir, el dibujo de planos. Sin embargo es en esta década donde Frank Gehry se encontró con una dificultad que sólo el uso de la computadora pudo resolver. El diseño del museo de Guggenheim de Bilbao se hizo de manera convencional, con maquetas de trabajo y bocetos, pero al llegar a la etapa de su representación técnica y construcción, llegaron las complicaciones y solucionar estructural y constructivamente el edificio habría sido una tarea que requiriera demasiado tiempo y gente con los métodos geométricos tradicionales. El software de CATIA que llevaba ya tiempo en el mercado y era utilizado en la industria aeronáutica, fue el elegido debido a que mediante un sensor, las curvas complejas de la maqueta podían ser escaneada e introducida a la computadora sin perder fidelidad, realizando cálculos que permitirían tanto la documentación como los despieces necesarios para su construcción.⁹

⁹ Steele, James. *Arquitectura y revolución digital*. México: Gustavo Gili, 2001, p.p. 122-133

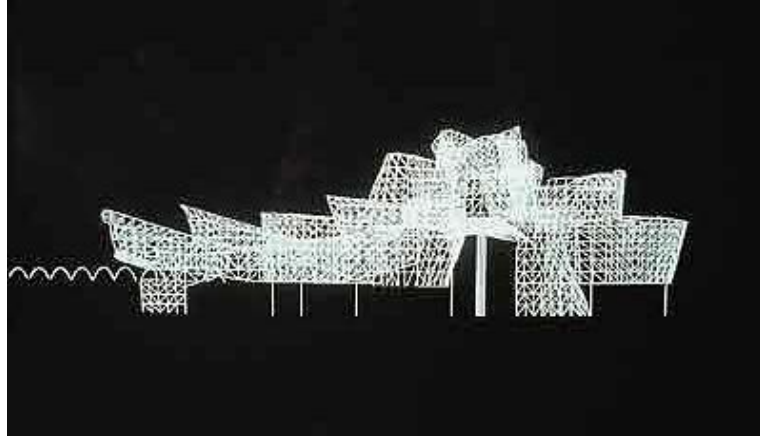


FIGURA 9. Curvas complejas del Guggenheim introducidas a CATIA como mallas tridimensionales

El avance técnico en los componentes de las computadoras y los sistemas operativos de 32bits, los cuales permiten manejar una mayor cantidad de información, hicieron posible desarrollar software cada vez más complejo y es por esto que a mediados de los 90 aparecen muchos programas de CAD para una gran variedad de usos y aplicaciones. Para el año de 1997 el costo por GFLOP era de USD \$30,000¹⁰ y dos años más tarde, en 1999, ya se ubicaba en \$1,000.¹¹ A finales de los 90 muchos arquitectos utilizan ya los programas de CAD de forma habitual en etapas de representación y producción de proyecto, con lo cual se obtuvo la confianza para dar una oportunidad en el área del diseño.

¹⁰ Pentium Pro Inside: I. A Treecode at 430 Gigaflops on ASCI Red, II. Price/Performance. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://loki-www.lanl.gov/papers/sc97/>

¹¹ A Comparison of Local and Gang Scheduling on a Beowulf Cluster. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://cs.anu.edu.au/~Peter.Strazdins/seminars/GangLocalSchedBeowulf.pdf>

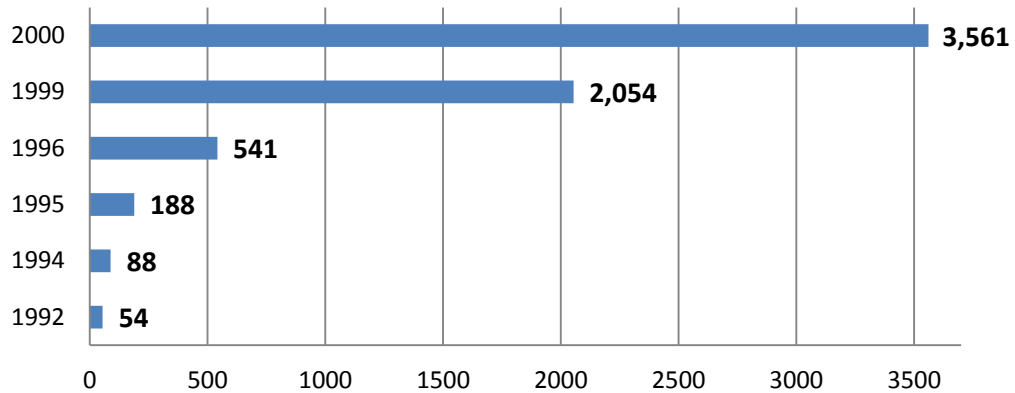


GRÁFICO 3. Capacidad en MIPS (Millones de Instrucciones por segundo) de los microprocesadores de las computadoras entre los años 1990 – 2000¹²

En 1998 surgen dos programas muy utilizados en la concepción de diseños arquitectónicos complejos: FormZ de AutoDesSys y el Rhinoceros 3D de McNeel. El FormZ trabajaba tanto en Macintosh como en Windows y se hizo popular entre académicos y arquitectos gracias a sus herramientas de modelado de sólidos, mientras que el Rhinoceros es una herramienta de software para modelado en tres dimensiones basado en NURBS, creado originalmente por Robert McNeel & Associates como un agregado para AutoCAD, sin embargo termina siendo un programa independiente; se caracteriza por su sencillez para modelar formas complejas mediante NURBS, por tener una interfaz y modo de operabilidad por comandos muy al estilo del AutoCAD (lo cual lo hace muy familiar para los usuarios de ambos programas) y por la disponibilidad de plugins y rutinas programadas por terceros que permiten la generación de formas geométricas a partir de una serie de parámetros.

¹² PC CPU Performance Comparisons. Recuperado el 17 de abril de 2012, de <http://www.roylongbottom.org.uk/cpuspeed.htm>

Entre los arquitectos que destacan en el fomento de software para el diseño arquitectónico, se encuentra Morphosis fundadores de SCI-Arc, formado por Tom Mayne y Michael Rotondi. Más tarde este último formaría su propio despacho llamado RoTo Architects.

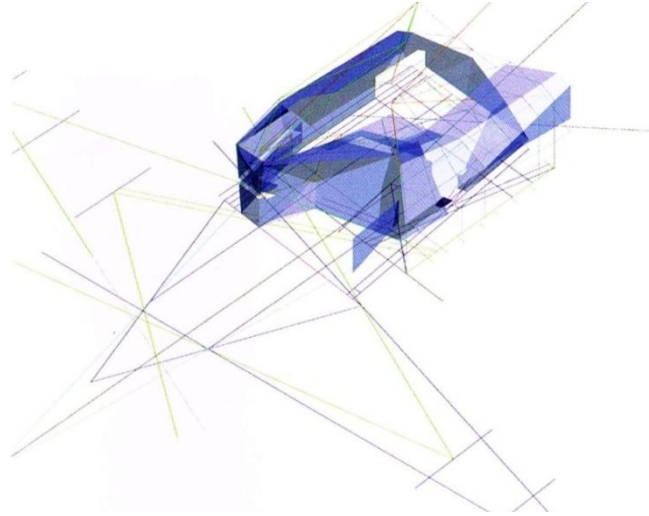


FIGURA 10. Antes de iniciar el proceso de diseño, RoTo utiliza el software para extraer de un proyecto su información más objetiva.

2.1.1.8. AÑOS 2000 – 2011

Esta década se ha caracterizar por reducir la brecha entre estaciones complejas de trabajo y las computadoras de escritorio a un estado casi irreconocible entre sí. Si se observa la gráfica en el gráfico 4, se puede apreciar la gran capacidad de procesamiento que se puede obtener en la actualidad con equipos de común adquisición en el mercado. Esto ha traído como consecuencia que para el año de

2000 el costo por GFLOP se redujo a USD \$64013 y gracias a la aparición de los procesadores de varios núcleos, esta cifra se ha reducido drásticamente a USD \$82¹⁴ en el 2003, USD \$48¹⁵ en el 2007 y tan solo a USD \$1.80¹⁶ al 2011.

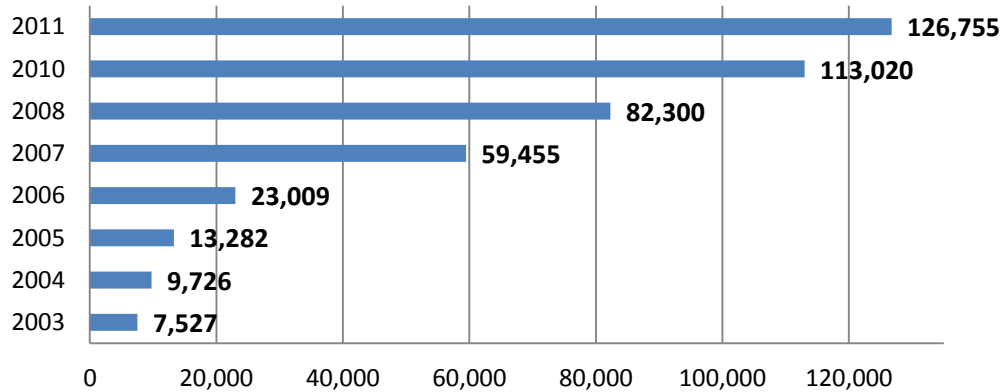


GRÁFICO 4. Capacidad en MIPS (Millones de Instrucciones por segundo) de los microprocesadores de las computadoras entre los años 1980 – 1990¹⁷

Esta accesibilidad a la tecnología permite a fabricantes de software llegar a más consumidores e invertir tiempo en realizar herramientas más sencillas de uso. El ejemplo más claro de esta práctica es la introducción del programa Sketchup al uso común, donde el fabricante otorga una versión gratuita del programa para que cualquier persona interesada en visualizar una idea lo pueda hacer mediante el uso del 3D, así como cuando en su momento se establecieron aplicaciones de uso

¹³ Kentucky Linux Athlon Testbed 2 (KLAT2). Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://aggregate.org/KLAT2/>

¹⁴ . KASY0. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://aggregate.org/KASY0/>

¹⁵ . Microwulf: A Personal, Portable Beowulf Cluster . Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://microwulf.org/>

¹⁶ . Stevenson, Adam. High-performance computing on gamer PCs. Recuperado el 19 de abril de 2012, de <http://arstechnica.com/science/news/2011/03/high-performance-computing-on-gamer-pcs-part-1-hardware.ars>

¹⁷ *op. Cit.* 10

general como lo son los procesadores de texto, hojas de cálculo y programas de presentación de diapositivas.

Gracias a la capacidad mejorada que tienen los sistemas para manejar grandes cantidades de información de una manera eficiente y veloz, se retoma el concepto que había introducido el Archicad en la década pasada y se comienza a popularizar el uso de software de modelado de información de construcción (BIM), permitiendo al usuario diseñar con elementos de modelación y dibujo paramétrico basado en objetos en lugar de la manera tradicional de representación vectorial. Estos programas permiten la fabricación virtual del edificio y poder anexar y obtener cualquier dato que se requiera de este, de una manera rápida y eficaz.

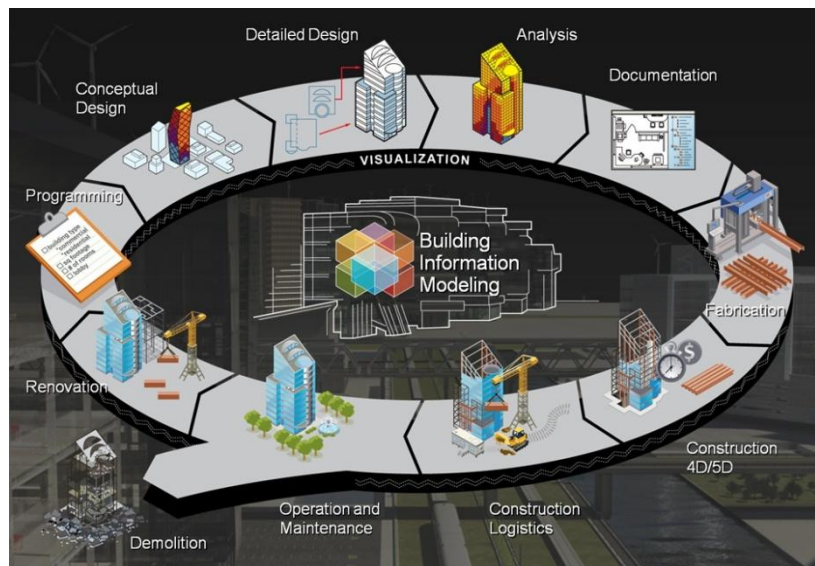
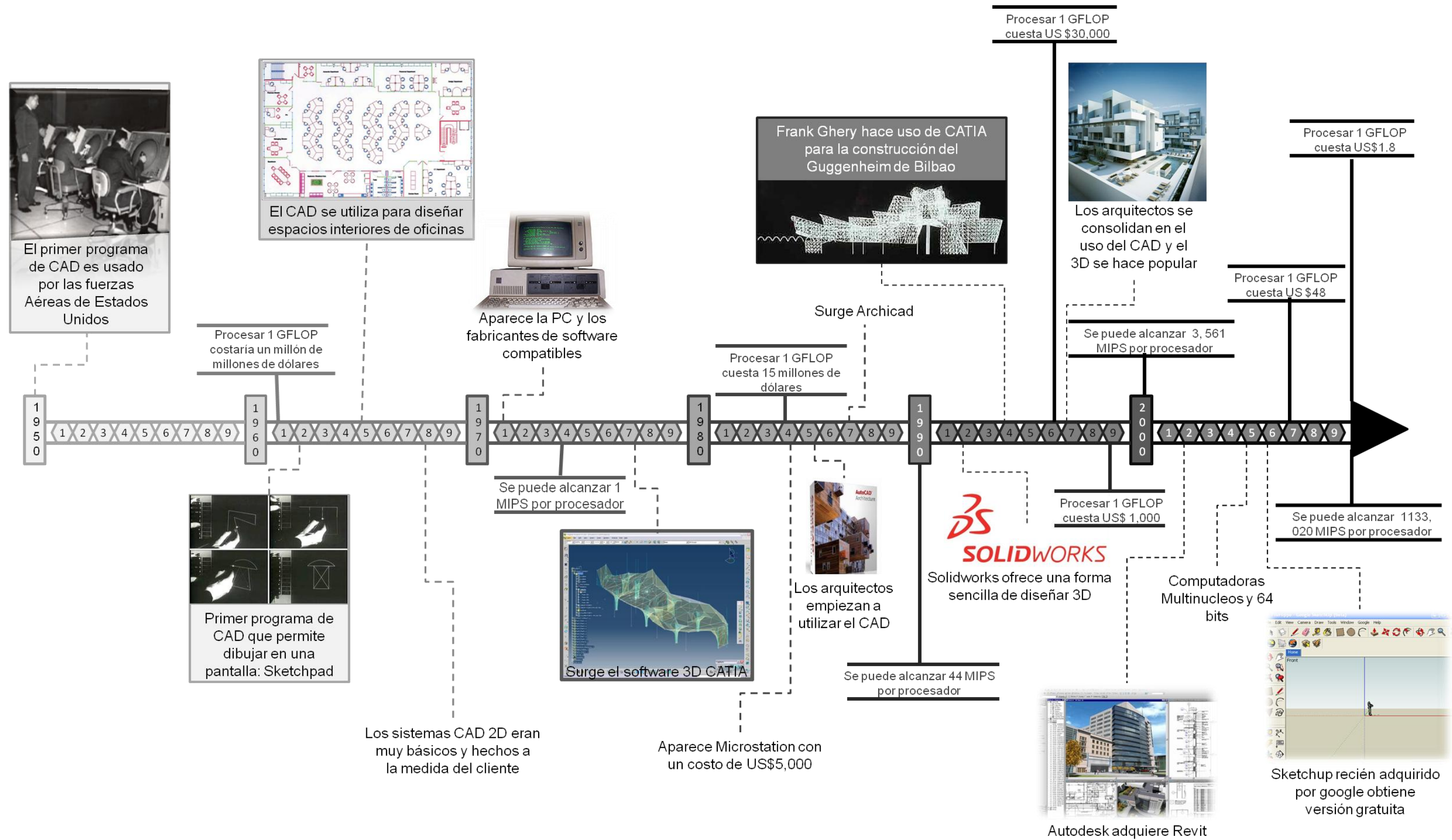


FIGURA 11. El concepto BIM engloba la gestión de toda la información que se genera a lo largo del proceso de proyecto, desde la fase de diseño conceptual, el anteproyecto y la toma de decisiones constructivas hasta las fases más avanzadas e incluso demolición.

El programa Microstation incluyó esta característica a su serie de herramientas tradicionalmente incluía. AutoCAD por su parte, opta por adquirir las empresas que desarrollaron las tecnologías para Revit, (este es un programa cuyo enfoque es a la construcción de los edificios y no al diseño arquitectónico), y en el 2002 lo convierte en su software dedicado a la arquitectura e ingeniería civil.

Haciendo un enfoque fuera del ejercicio profesional, al introducirse la enseñanza del software en universidades, los alumnos comienzan a experimentar con nuevas ideas generativas de proyecto y desde una etapa tan temprana de formación, se tiene acceso a la tecnología que permite realizar la formación y visualización de ideas dentro de un espacio virtual que puede ser compartido y enriquecido por opiniones de otras personas.

2.1.2. Línea de tiempo



2.2. MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO – CONCEPTUAL

Como se vio en el marco histórico, el uso de las computadoras ha venido evolucionando desde las primeras experiencias de arquitectura asistida por computadores en los años 60, hasta llegar a un estado tecnológico adecuado y accesible donde los arquitectos pueden enfocarse completamente en la solución de problemas en un entorno virtual, sin la necesidad de poseer tantos conocimientos técnicos. Entre los esfuerzos pioneros en el área, en los inicios de los años 90 se mencionará a Marco Novak con la transarquitectura y como gracias a esta evolución de la arquitectura digital se pueden aplicar métodos propios de las ciencias computacionales.

A través de la arquitectura digital definiremos métodos paramétricos en la labor de espacios y los software adecuados para esta investigación con los diagramas de Voronoi.

2.2.1. ARQUITECTURA DIGITAL

Las tecnologías digitales están cambiando las prácticas arquitectónicas de una manera que pocos eran capaces de anticipar hasta hace muy pocos años; con ellas, se permite llevar a cabo exploraciones mediante las que se genera espacio geométrico no euclidiano, sistemas cinéticos y dinámicos y algoritmos genéticos.¹⁸

Las formas generadas digitalmente son expresión de una aproximación renovada a la arquitectura, en la que convenciones estéticas o de estilo son ignoradas a favor de una experimentación constante basada en la generación digital y la

¹⁸ Koralevic, Branco. "Introduction" in Branco Koralevic (ed.), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Nueva York, Spon Press, 2003, p. 3.

transformación de formas que responden a contextos complejos e influencias funcionales.

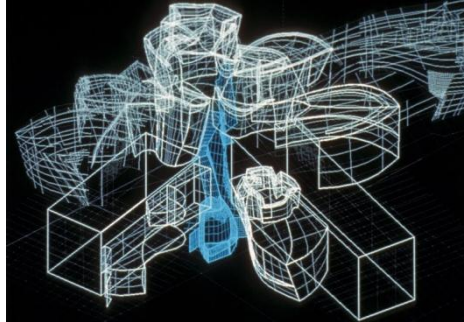


FIGURA 12. El proceso de diseño y construcción del Guggenheim de Bilbao se hizo posible gracias al uso de herramientas digitales.

La base de lo digital siempre suele ser un evento análogo, el cual se digitaliza para ser procesado y reproducido de una manera más sencilla y controlable. Bruscato menciona que el término arquitectura digital es impreciso en su vinculación con la arquitectura contemporánea, proponiendo el uso de otro concepto: arquitectura generada mediante técnicas digitales o en las que intervienen herramientas digitales; y aplicarlo en aquellas arquitecturas que en su uso de lo digital, se quieren presentar como concepción avanzada del pensamiento y la práctica arquitectónica. Justifica que en estos casos concretos, lo digital adquiere una intervención activa y deviene eje y fundamento esencial.¹⁹ La arquitectura digital ofrece un fundamento científico más exacto a la arquitectura simbólica, en particular a lo referente a las formas orgánicas o sistemas inspirados en la naturaleza. Existen estudios que mediante la observación de patrones naturales, se formulan algoritmos que pueden materializarse en formas virtuales. Estas

¹⁹ Bruscato Portella, Underléa. *De lo digital en arquitectura*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2006, p. 25.

formas a su vez pueden aplicarse en diversos escenarios y elegir a más adecuada para el problema que se plantee.

Entre los beneficios que aporta la arquitectura digital destacan:

1. Hacer uso de las computadoras para la creación de formas geométricas a partir de formulas matemáticas distribuidas siguiendo parámetros preestablecidos.
2. Tiene la ventaja de que no importando la complejidad, puede construirse mediante piezas ensambladas cortadas por una maquina que lee la información digital del objeto virtual y la traduce en cortes en el material seleccionado.
3. Permite la experimentación de múltiples escenarios hipotéticos para compararlos y poder elegir el más adecuado.

Este último punto se refiere al concepto de arquitectura virtual, el cual se define como aquel universo de objetos construidos, visualizados, accedidos, manipulados y utilizados tridimensionalmente, con propósito arquitectónico y de permanencia con derecho propio, en un ámbito digital informático que les confiere su condición de virtualidad²⁰

Dentro de la Arquitectura digital existen arquitectos teóricos como Marcos Novak, el cual marca un cambio en el lenguaje arquitectónico, la transarquitectura, que consta de lugares de acceso remoto, geometría no eucladiana, y da una pauta de lo que podría ser en un futuro los sitios de interrelación.

²⁰ Vélez Jahn, Gonzalo. *Arquitectura Virtual: Fronteras, en construyendo el espacio digital*. Libro de Ponencias del 4° Congreso de SIGraDi, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.



FIGURA 13. Transarquitectura de Marcos Novak

Como se mencionó anteriormente, prácticamente todos los Arquitectos en la actualidad hacen uso de la arquitectura digital en alguna etapa del proyecto. Ya sea para generar, diseñar, visualizar, etc. las herramientas tecnológicas permiten además construir, mediante sistemas industriales de corte y doblado, las piezas que conforman a un edificio, no importando su complejidad y con la exactitud necesaria para llevarlo a cabo. Esto libera de limitaciones a la imaginación y contribuye a explorar nuevos métodos para diseñar.

2.2.2. DISEÑO PARAMÉTRICO

El diseño paramétrico es la abstracción de una idea o concepto, relacionado con los procesos geométricos y matemáticos, que permiten manipular con mayor precisión un diseño para llegar a resultados óptimos.²¹

²¹ Molinare, Alexandra. Diseño Paramétrico. Recuperado el 16 de abril de 2012, de <http://www.plataformaarquitectura.cl/author/alexandra/>

Este tipo de diseño puede realizarse desde la etapa generativa del proyecto, para esto, deben establecerse un modelo con los parámetros iniciales que van a regular a lo largo de la parte experimental.

Es muy importante tener una visión clara de las aplicaciones y del potencial del diseño paramétrico, ya que permite optimizar diversos procesos en el diseño, como el cálculo de estructuras, costos, simulaciones físicas, producción digital, exploración de formas arquitectónicas e industriales para facilitar su construcción digital.

El papel que juega el arquitecto en el diseño paramétrico es fundamental en todas sus etapas, teniendo como enfoque principal el diseño del proceso y no un resultado en concreto. Se desarrolla una colección de relaciones matemáticas y geométricas creando modelos y sistemas los cuales permiten explorar más de un resultado que guarden las mismas premisas de diseño establecidas previamente.



FIGURA 14. El arquitecto controla todas las etapas del proceso de diseño.

En este trabajo se propone para el desarrollo del proceso el uso de un tipo de geometría computacional en particular, con el fin de que a través de una computadora se generen formas a partir de datos preestablecidos.

2.2.3. GEOMETRÍA COMPUTACIONAL

La geometría computacional se ocupa del diseño y análisis de algoritmos de computación para resolver problemas de tipo geométrico. Sus orígenes se encuentran en la tesis doctoral de M. I. Shamos en 1975 y desde entonces el campo se ha expandido considerablemente con una cantidad apreciable de resultados. La investigación en esta área ha encontrado muchas aplicaciones en

algunas disciplinas fuera de la informática: como en robótica, reconocimiento de voz y de patrones, diseño gráfico, sistemas de información geográfica, etc.

Entre los tipos de geometrías destacan dos tipos complementarios entre sí debido a su utilidad y aplicación en la arquitectura: el diagrama de voronoi y la triangulación de Delaunay.

2.2.3.1. DIAGRAMA DE VORONOI

A diferencia de la arquitectura orgánica que trata de imitar lo natural, la arquitectura digital es la llave que resuelve la pregunta sobre los parámetros geométricos en la naturaleza.²² Los diagramas de Voronoi son un tipo de estructuras geométricas que aparecen con frecuencia en la naturaleza, fueron discutidos por primera vez por Peter Lejeune-Dirichlet en 1850, pero fue hasta mucho después en 1908 que estos diagramas fueron escritos por el matemático ruso Georgy Voronoi.



FIGURA 15. Ejemplos de diagramas de Voronoi encontrados en la naturaleza

²² Hwang Irene, Sakamoto Tomoko, Ferré Albert. *Verb Nature*. Barcelona, Actar, 2006, pp. 7-8.

La geometría de Voronoi es un fenómeno de organización que algunas veces es denominado la regla natural, es encontrado en una gran variedad de escalas, materiales y formas de vida. Es una descomposición de un espacio métrico en regiones, asociada a la presencia de objetos, de tal forma, que en dicha descomposición, a cada objeto se le asigna una región del espacio métrico formada por los puntos que son más cercanos a él que a ninguno de los otros objetos.²³

Se encuentra como uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos.

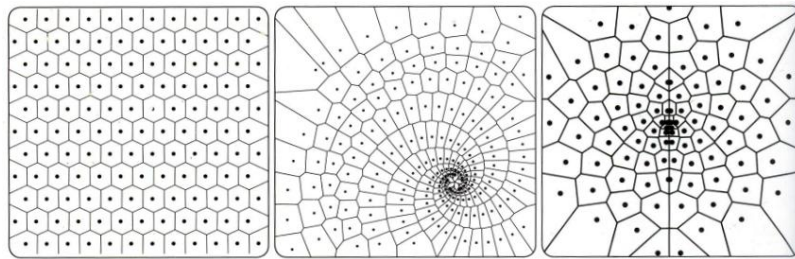


FIGURA 16. Distintas formas de diagramas de Voronoi de acuerdo a la ubicación de los puntos de control en un espacio delimitado

Para entender su formación, se parte de una cantidad de n puntos ubicados en un plano. Si estos puntos comienzan a crecer concéntricamente a la misma velocidad, cada punto se apropia del área que ocupa el círculo centrado en él siempre y cuando no esté previamente ocupada por otro. Al final, cuando los

²³ Abellanas, Manuel. *Envolverte convexa, triangulación de Delaunay y diagrama de Voronoi: tres estructuras geométricas en una*. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid Facultad de Informática Departamento de Matemática aplicada.

radios de los círculos tienden a infinito, aparecen las regiones del plano que le corresponde a cada uno de los puntos.

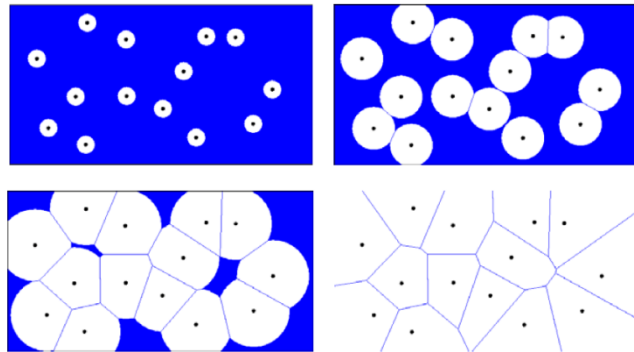


FIGURA 17. Proceso de obtención de un diagrama de Voronoi mediante la expansión de círculos

Los diagramas de Voronoi tienen numerosas aplicaciones en diversas áreas que van desde la arqueología hasta la zoología. Una aplicación en urbanismo, por ejemplo, consiste en subdividir el mapa de una ciudad en zonas de proximidad a unos ciertos puntos importantes o especiales y analizar la relación o influencia que tienen entre sí. Otra aplicación puede ser la parcelación de una ciudad en zonas en relación a la proximidad de los colegios o, en el caso de la telefonía móvil, la división del espacio en función de la conexión a la antena que los usuarios tienen más próxima.

Por otro lado, los diagramas de Voronoi reciben otros nombres cuando se utilizan en disciplinas como la geografía, la cristalografía o la biología: Teselaciones de Dirichlet, particiones de Thiessen, zonas de Brillouin, celdas de Wigner-Seitz o

regiones potencialmente disponibles, zonas de influencia, regiones de proximidad, etc.

El trazo de un diagrama regularmente se realiza utilizando algoritmos que ayudan a facilitar esta tarea, sin embargo el procedimiento general se describe a continuación:

Se comienza con una serie de puntos ubicados en un espacio bidimensional sin que sea necesario que guarden alguna relación uno con otro.



FIGURA 18. Conjunto de puntos inicial

Posteriormente se unen únicamente los puntos más cercanos entre sí, evitando cualquier posible traslape de líneas.

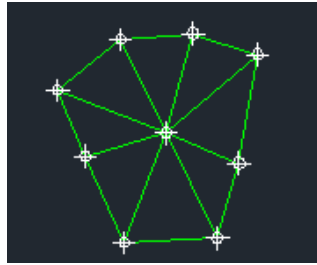


FIGURA 19. Unión correcta de puntos cercanos.

Se trazan las mediatrices de los segmento de unión, proyectándolas hacia el infinito hasta que se crucen unas con otras.

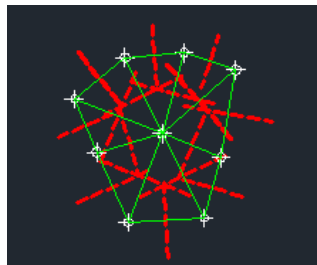


FIGURA 20. Proyección de mediatrices.

Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

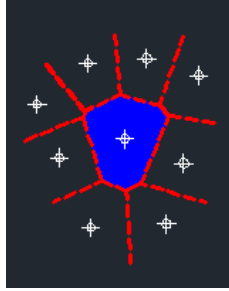


FIGURA 21. La intersección de las perpendiculares delimitara la región que le corresponde a cada uno de los puntos.

En la siguiente figura se muestran las partes que forman un diagrama de voronoi, tomando como ejemplo un conjunto denominado "S" formado de 8 puntos.

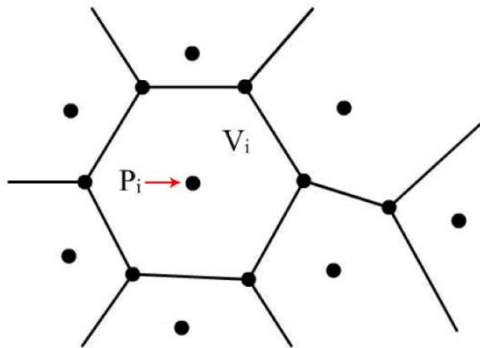


FIGURA 22. Partes de un diagrama de Voronoi

El polígono convexo V_i que contiene al punto p_i se llama Polígono de Voronoi del punto p_i . Los vértices del diagrama se llaman Vértices de Voronoi y los segmentos de recta del diagrama se llaman Lados de Voronoi.

Una primera observación al diagrama permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Si tenemos un punto p_i en S , entonces su vecino más próximo se halla en alguno de los polígonos de Voronoi adyacentes a V_i .
- Si ordenamos en una lista cada punto p_i con su vecino más cercano, entonces se puede buscar en dicha lista el par de elementos de S más cercanos.

2.2.3.2. TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY

Una triangulación de Delaunay es una red de triángulos que cumple la condición de Delaunay. Esta condición dice que la circunferencia circunscrita de cada elemento de una red triangular no debe contener ningún vértice de otro triángulo. Se le denomina así por el matemático ruso Boris Nikolaevich Delaunay quien lo inventó en 1934.

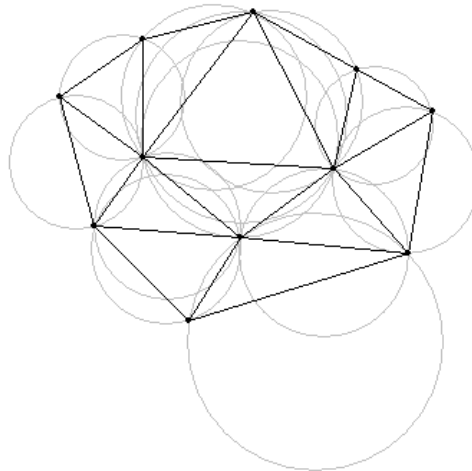


FIGURA 23. Comprobación de la condición de Delaunay

Si se conectan mediante un segmento rectilíneo dos de los puntos, sus correspondientes regiones de Voronoi comparten parte de su frontera, dando como resultado la triangulación de Delaunay de los puntos.

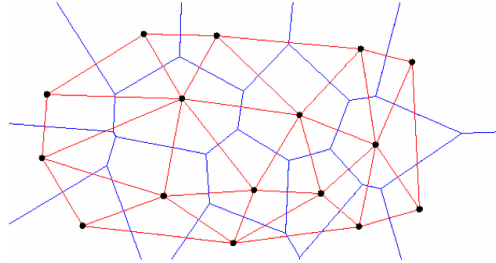


FIGURA 24. Relación entre la triangulación de Delaunay y el diagrama de Voronoi

Esta relación entre la triangulación de Delaunay y el diagrama de Voronoi de un conjunto de puntos es una dualidad punto-región y arista-arista: Se puede asociar a cada vértice de la triangulación, que son los puntos del conjunto dado, su correspondiente región de Voronoi. Cada triángulo de la triangulación se corresponde con su circuncentro, que es precisamente un vértice del diagrama de Voronoi. Por su parte, cada arista del diagrama de Voronoi, determina a la vez una arista de la triangulación de Delaunay. Esta dualidad, como muchas otras, permite resolver problemas diferentes con las mismas técnicas. A partir de este descubrimiento, hablar de diagramas de Voronoi o de triangulaciones de Delaunay, es hablar de la misma estructura en lenguajes diferentes. Las propiedades de una se transforman en propiedades de la otra.

2.2.4. HERRAMIENTAS DIGITALES

Elaborar el trazo manual de alguno de los dos diagramas antes mencionados a partir de un conjunto pequeño de puntos, resultaría una tarea laboriosa de algunas horas. Si el conjunto de puntos fuera extenso, el trabajo se traduciría en días.

Actualmente la solución de estos diagramas mediante el uso de una computadora, tarda segundos o milésimas de segundos. Esto se debe a que se procesan mediante algoritmos sumamente eficientes que pueden ser utilizados para ahorrarle tiempo al arquitecto y permitir una experimentación más amplia.

En cuanto al hardware necesario para realizar esta labor, no es necesario entrar en detalle, ya que cualquier computadora contemporánea tiene la capacidad para ejecutar los programas que a continuación se mencionan.

2.2.4.1. AUTOCAD

AutoCAD es el programa de diseño asistido por computadora más conocido y usados, por arquitectos, ingenieros y diseñadores industriales a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D en sus versiones más recientes.

Su aplicación principal es la representación en plano del diseño a proponer y debido a este uso, el programa carece de modalidades de procesamiento de datos ajenas para el trazado automático de líneas bajo condiciones preestablecidas, es decir, los datos deben ser ingresados por el usuario y en la pantalla se muestran gráficamente.



FIGURA 25. Autocad como herramienta de dibujo

2.2.4.2. RHINOCEROS 3D

Mejor conocido simplemente como Rhino, es un software que permite crear, editar, analizar, renderizar, animar y convertir curvas, superficies y sólidos sin alguna limitante en complejidad.

Gracias a que fue pensado en sus orígenes como un complemento para el AutoCAD, la usabilidad del programa es prácticamente idéntica en ambos programas; inclusive hacen uso de comandos escritos que se escriben y funcionan igual.

La versatilidad y las herramientas de análisis hacen de Rhino una aplicación muy útil para la experimentación en el diseño arquitectónico. En este caso de estudio

puede ser utilizado para el cálculo los diagramas de Voronoi, aunque no de manera nativa, sino con el uso de un complemento gratuito, el cual más adelante se especificará.

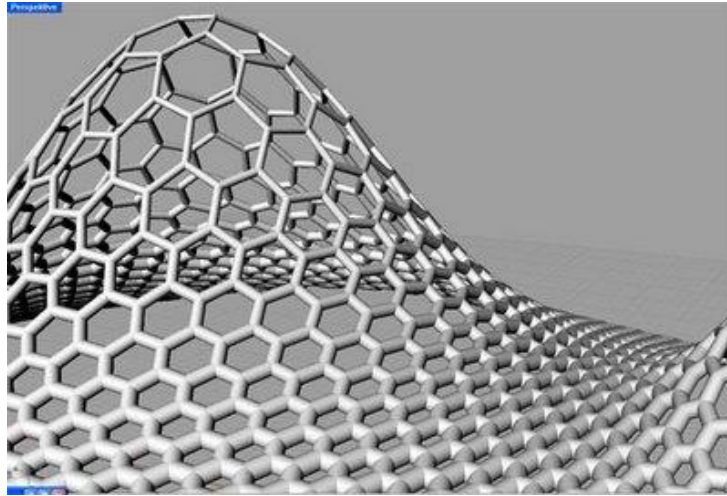


FIGURA 26. Modelado de una superficie paramétrica en el programa.

2.2.4.3. POINTSET RECONSTRUCTION, PLUGIN PARA RHINO

Un plugin se entiende, del inglés, como una extensión, añadidura o complemento de una aplicación que se relaciona con otra para aportarle una función nueva y generalmente muy específica. Esta aplicación adicional es ejecutada por la aplicación principal y puede ser desarrollada por un usuario avanzado o algún programador.

En el caso de esta tesis, se requiere que un programa realice cálculos para resolver diagramas de Voronoi a partir de una serie de puntos dados. El Rhino es el programa adecuado para realizar dicha tarea, sin embargo, no posee esa

función de manera nativa. Una herramienta llamada pointset reconstruction se puede descargar gratuitamente desde la página de internet del fabricante y se le instala al programa para agregar funciones específicas relacionadas con diagramas de Voronoi.

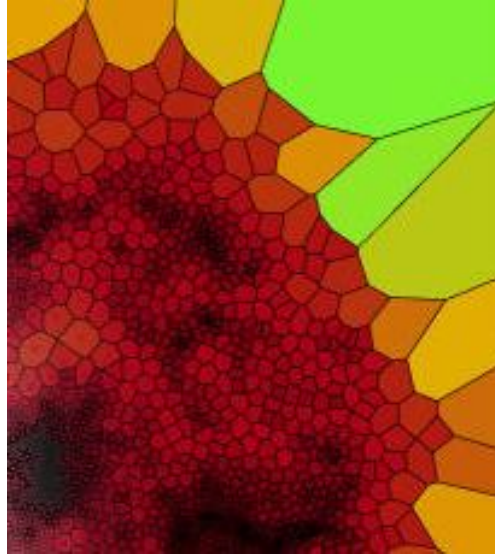


FIGURA 27. Diagrama de Voronoi creado en Rhino con el pointset reconstruction plugin

2.2.4.4. SKETCHUP

Sketchup es un programa informático de diseño y modelado en 3D para entornos arquitectónicos, ingeniería civil, diseño industrial, GIS, videojuegos o películas.

Este programa fue diseñado con el objetivo de que pudiera usarse de una manera intuitiva y flexible. SketchUp permite conceptualizar y modelar imágenes en 3D de edificios, coches, personas y cualquier objeto o artículo que imagine el diseñador o

dibujante. Además el programa incluye una galería de objetos, texturas e imágenes construida por los mismos usuarios, descargable en cualquier momento directo a la aplicación.

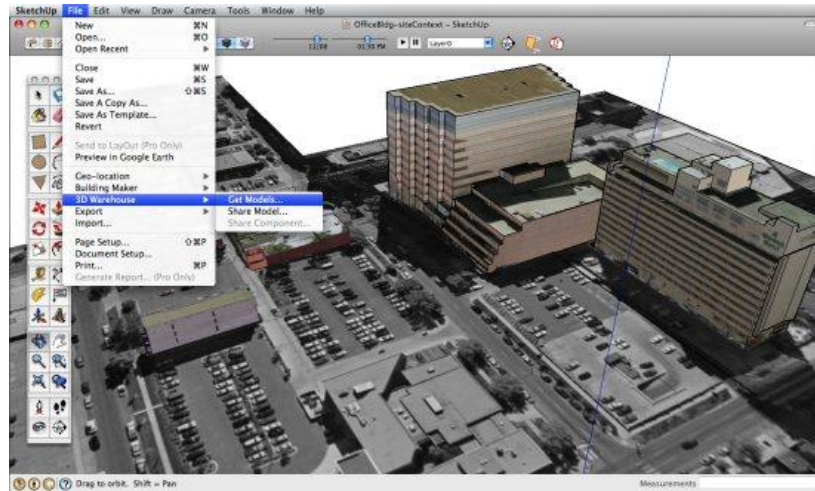
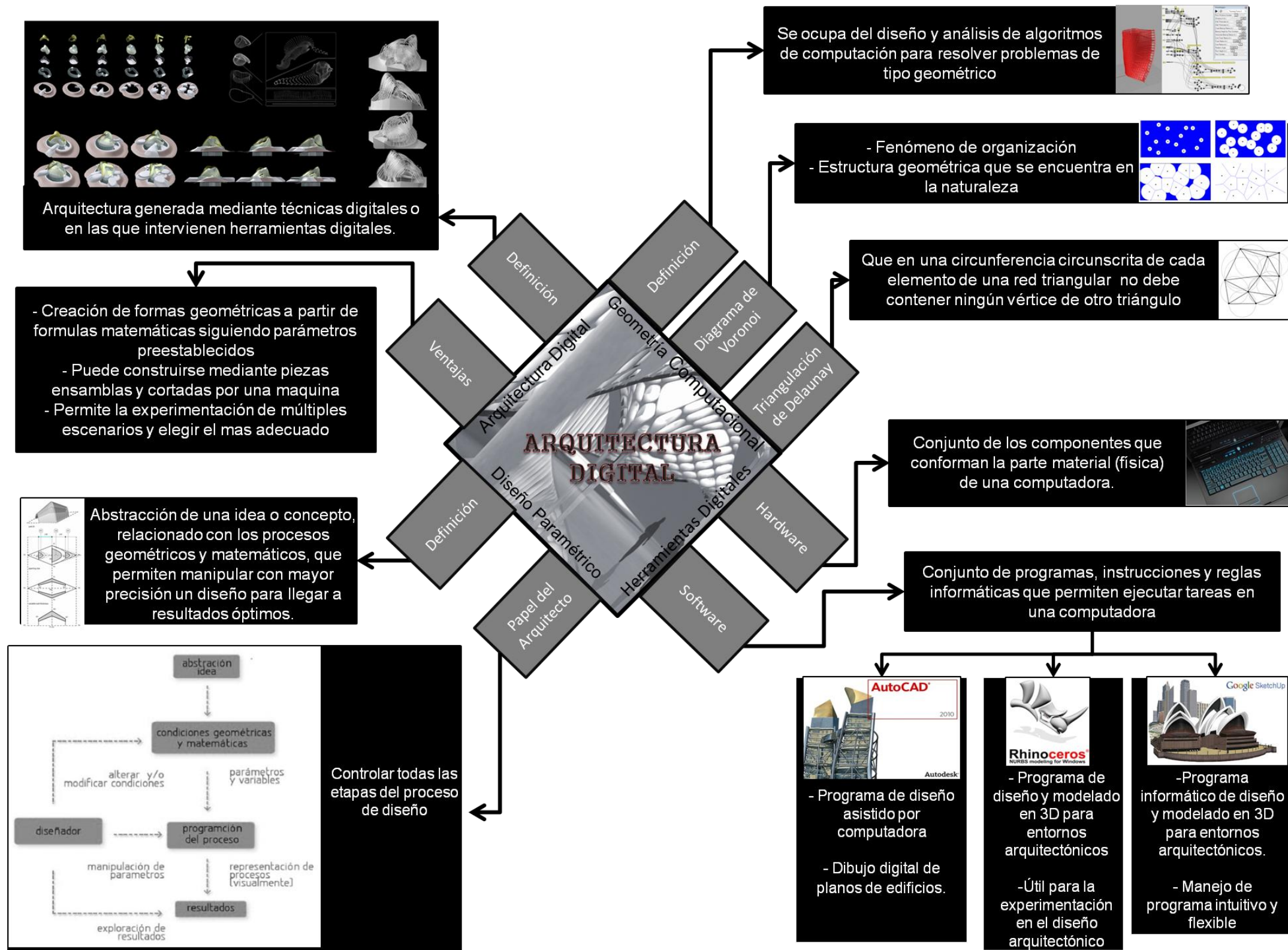


FIGURA 28. Sketchup permite georeferenciar el modelo y visualizar asoleamientos en tiempo real

Tiene la ventaja de que el modelo puede ser georeferenciado y realizar diversos análisis de asoleamientos fácilmente.

2.2.5. Síntesis de los referentes teóricos



2.3. MARCO DE REFERENCIA SITUACIONAL

2.3.1. ESTADO DEL ARTE

El deconstructivismo rompió la geometría tradicional en su camino por encontrar respuestas de cómo debía ser la forma y la función de un espacio, un edificio, etc. Frank Gehry tuvo la particularidad de llegar al límite de lo posible en arquitectura y dar un salto a una nueva gama de soluciones para resolver la construcción de formas: el uso de la tecnología digital. Este paso contribuyó a cambiar la percepción de lo imposible en la arquitectura y devolvió al arquitecto la única limitante que debe existir para él: su imaginación.



FIGURA 29. Casa danzante, Frank Gehry

Este cambio tan importante hizo que varios arquitectos se unieran al movimiento de realizar supuestos imposibles y buscar soluciones innovadoras, librándose de los límites, habiendo demostrado que con el uso de la tecnología y con los

avances en materiales y procesos automatizados, se podía lograr algo que nadie hubiese imaginado: que de una imagen virtual pasara a un lugar físico.

Norman Foster realizó un bosquejo del edificio Swiss Re Tower figura 30. En la que la apariencia formal de dicho edificio se encuentra a grandes rasgos en la idea inicial, mostrando parte esencial de la plástica que el arquitecto desea; sin embargo, el cálculo de las propiedades mecánicas del edificio que permitan construirlo, la incorporación de características de confort, el despiece de elementos, la simulación de su comportamiento en su entorno previsto, etc. Requiere de la tecnología y de programas especializados que ayuden a llevarlo a cabo. Este es uno de los ejemplo en los que en muchos casos no se pudieron haber realizados sin el uso de la tecnología.

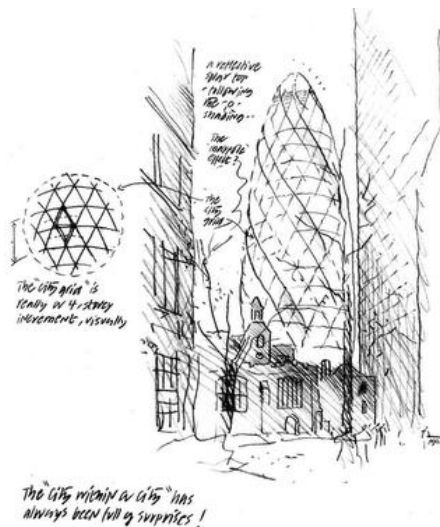


FIGURA 30. Swiss Re Tower, Norman Foster.

En la actualidad con la arquitectura digital, se abarca un mayor número de detalles a comparación de los métodos tradicionales, provocando con esto un beneficio

tanto para el arquitecto como para el cliente. Haciendo uso de programas modeladores, se obtienen imágenes 3d, vistas panorámicas de 360 grados que abarcan la totalidad del espacio proyectado, visual y estructuralmente, dando como resultado edificios sostenibles, eficientes, complejos, rápidos, etc.

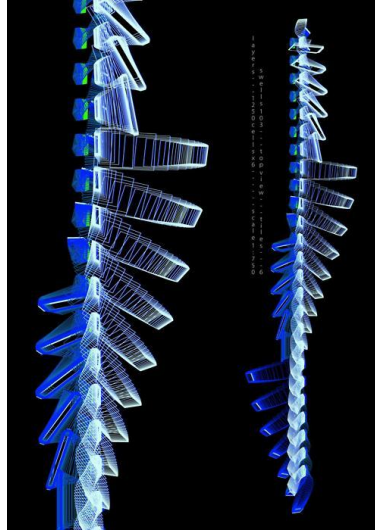


FIGURA 31. Swells, Alisa Andrasek

Los arquitectos de nuevas generaciones empiezan a experimentar con la naturaleza, realizando formas cada vez más interesantes y complejas, no solo con sus envolventes, si no que empiezan a generar una serie de espacios nuevos, no importando si es geométricamente perfecta, sino rompiendo con lo perfecto y volviéndolo naturalmente posible, creando homogeneidad entre los edificios y el medio ambiente.

Esta experimentación con la naturaleza se hace posible debido al entendimiento que se tiene actualmente de procesos naturales y por medio de herramientas

digitales que ya son suficientemente potentes como para poder reproducirlas en situaciones virtuales en un tiempo razonable.

Del mismo modo, al virtualizar el objeto, su forma posee características que la computadora traduce en datos digitales. Estos datos son utilizados no solo en el proceso de diseño, sino también en los procesos constructivos, los cuales han evolucionado de tal manera que existen empresas constructoras que construyen edificios hasta de 30 niveles en tan sólo 15 días. Este logro únicamente se ha adquirido luego de pasar por todo un proceso cuidadosamente diseñado que implica la virtualización del proyecto.

El diseño actualmente está ligado al avance tecnológico y aprovechamiento de los recursos digitales que optimizan los tiempos, equipos, procesos y materiales, necesarios para lograr un edificio totalmente resuelto desde sus primeras etapas.

2.3.2. CASOS ANÁLOGOS

Gracias al avance en computadoras y de programas para la visualización de los proyectos en 2D y 3D, los arquitectos han tomado estas herramientas para la experimentación de nuevas formas y soluciones a problemas comunes.

Usando el mundo virtual como lugar de exploración y la geometría computacional como herramienta, se genera una interface entre el arquitecto y la arquitectura que nos abre un campo de experimentación ilimitado.

En los siguientes ejemplos en los cuales unos son experimentales y otros reales mostraremos lo expuesto en esta tesis, destacando los que han sido diseñados mediante parámetros o variables y que gracias al uso de la computadora se permiten explorar múltiples escenarios antes de concluir con la forma definitiva.

2.3.2.1. VERTICAL VILLAGE



FIGURA 32. Vertical Village

Arquitecto: Rajiv Sewtahal, Yushang Zhang, Riemer Postma, and Qianqian Cai

Ubicación: Nora, Italia

Año de proyecto: 2011

Destino: Edificio de vivienda

Tipo de Proyecto: Experimental

Concurso: d3 Housing Tomorrow 2011 Competition.

El principal objetivo en el diseño de la *Vertical Village* era gozar el tipo de vida de una villa sin ocupar tanto terreno como se haría comúnmente. Las casas se conciben como células cuya forma debe contemplar la mayor superficie utilizable tanto en sentido vertical como horizontal.

Para la obtención de los espacios se utilizaron diagramas de Voronoi que llevarían a cabo la partición del terreno, sin embargo, se encontró la problemática de que aún cuando en planta funcionaba correctamente, en alzado se creaban espacios desequilibrados o difícilmente utilizables para propósitos habitables.

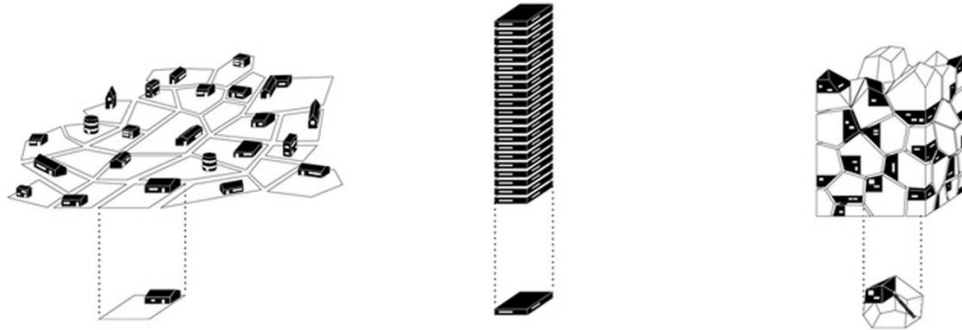


FIGURA 33. El principal objetivo es ocupar el menor espacio posible de terreno

La solución a este inconveniente fue la modificación de la ubicación de los puntos que generarían el diagrama de Voronoi. Tradicionalmente la nube de puntos carecería de alguna lógica geométrica, sin embargo, se observó que al hacer un arreglo ortogonal, formado a partir únicamente de los vértices de segmentos verticales y horizontales, el problema había sido solucionado; las formas que arrojaba el diagrama con esta modificación, resultaron ser más amigables para su uso como perfil de un espacio habitable.

En la figura 34 se puede apreciar una comparativa de las formas resultantes a partir del uso tradicional de un diagrama de Voronoi y la versión modificada que se denomina división de Voronoi semi-ortogonal.

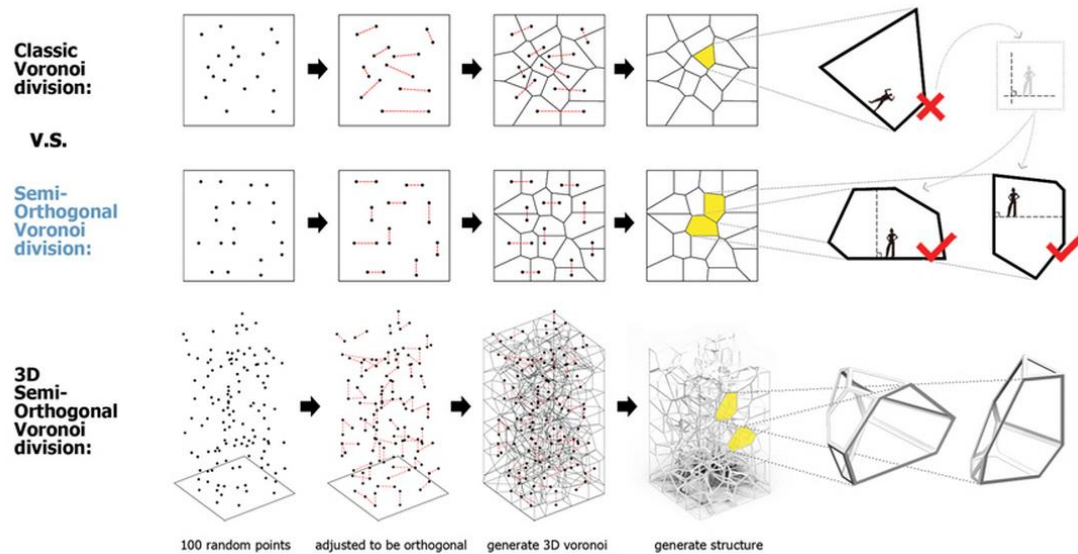


FIGURA 34. Proceso de diseño

Una vez resueltas las secciones, se procedió a obtener las subdivisiones, pero en esta ocasión, a partir de una nube de puntos tridimensional del tamaño de los límites del edificio a formar, dando como resultado a los módulos habitables, como se puede apreciar de nuevo en la Figura 35.

Las diferencias que existen entre cada uno de los módulos es notoria, ninguno se repite y todos son lo suficientemente amplios como para realizar actividades propias de una vivienda dentro en ellos.

Adicionalmente de obtener la forma característica del edificio, también se crea la estructura que lo soporta. Del mismo software se pueden obtener las dimensiones y coordenadas para poder calcular las dimensiones estructurales.

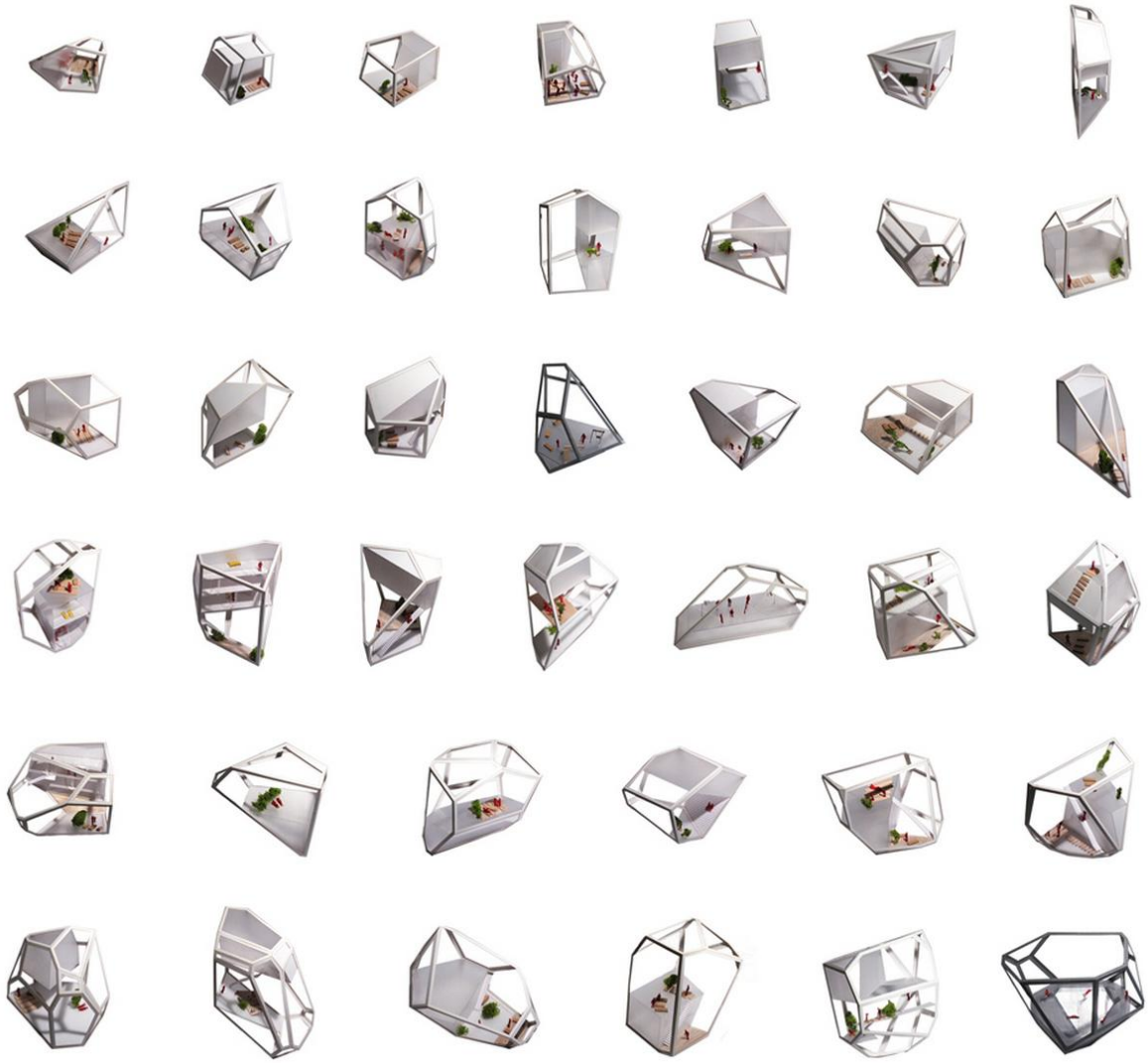


FIGURA 35. Diferentes tipos de vivienda dentro del edificio

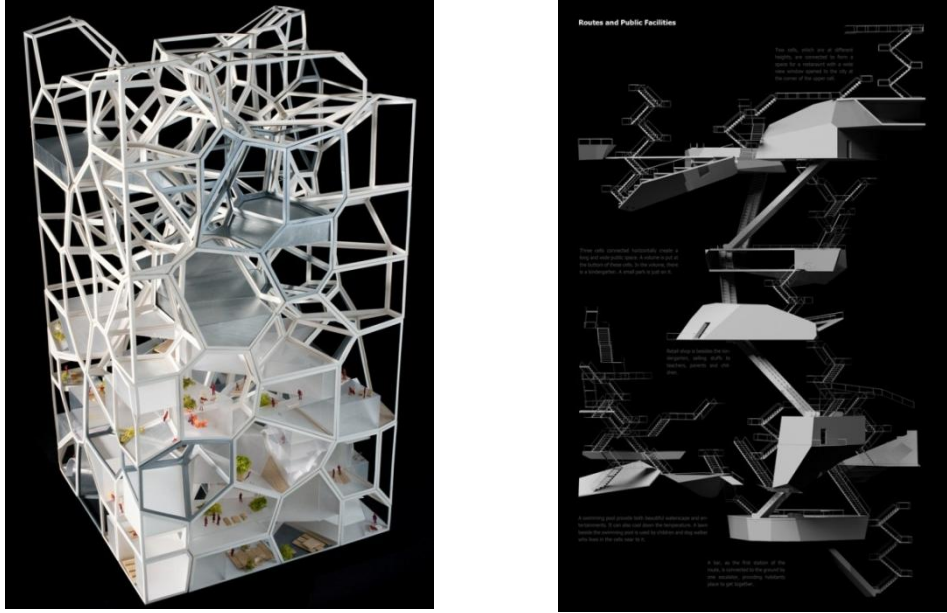


FIGURA 36. Estructura y corte

Este proyecto experimental, ejemplifica perfectamente cómo se pueden materializar espacios creados a partir de algoritmos computacionales en beneficio de la arquitectura. Aquí los arquitectos organizan y determinan las formas, en base a cálculos establecidos y con parámetros predeterminados, tomando como referencia las bases que debe poseer un espacio funcional que responde a las necesidades determinadas para su función.



FIGURA 37. Render interior y maqueta.

2.3.2.2. TORRE SWISS RE



FIGURA 38. Torre Swiss Re

Arquitecto: Norman Foster

Ubicación: Londres, Inglaterra

Año de Proyecto: 2000

Año construcción: 2004

Destino: Edificio de oficinas

Superficie: 76,400 m²

Conceptualmente hablando, la torre Swiss Re, toma ideas del diseño de Buckminster Fuller para la *Climatroffice* a principio de la década de los 70's. Aquel proyecto visualizaba un espacio de oficina envuelto por una piel de vidrio curva, la cual creaba su propio microclima dentro del edificio. En ese tiempo, la geometría

compleja y doblemente curva de Fuller habría sido muy difícil de conseguirse, por lo que el proyecto nunca se construyó.

Actualmente las tecnologías digitales hacen posible el diseño y la construcción de edificios como este ejemplo en una fracción de tiempo comparado a décadas anteriores. El modelado paramétrico, originalmente desarrollado en las industrias aeroespacial y automotriz como una forma de lograr el diseño de formas curvas complejas, tuvo un efecto fundamental en el proceso de diseño del edificio.

Los valores que forman el modelo tridimensional se obtienen de una hoja de cálculo convencional, la cual contiene las relaciones entre varias características del diseño y las transforma en ecuaciones matemáticas, esto con el fin de evitar la complejidad del uso de software especializado y además permite que cualquier elemento en el modelo pueda ser modificado en tiempo real.

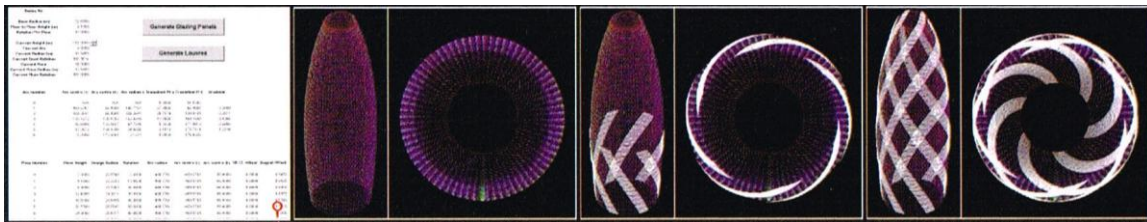


FIGURA 39. La geometría del proyecto es controlada y compartida por una hoja de cálculo de Excel, la cual es ligada al programa para generar la forma visual y apreciar las modificaciones

El software empleado para la visualización del proyecto fue el Bentley's Microstation, gracias las capacidades paramétricas que posee un componente del programa llamado: componente generativo.

El edificio Swiss Re es un claro ejemplo en el uso de parámetros en la estrategia de diseño. Toma la idea preconcebida del mercado que se tiene de un esquema de oficina y a través de variables informáticas, las transforma en un diseño óptimo donde la estética surge a partir de criterios de desempeño ideales.

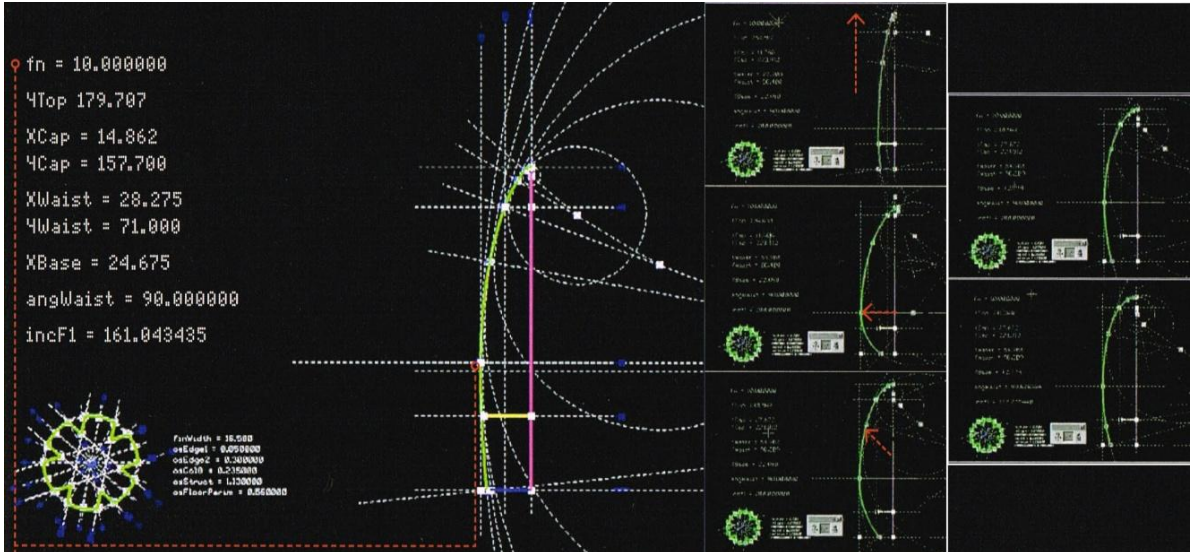


FIGURA 40. Modificando datos simples en la hoja de Excel como: alto, ancho, diámetro y otros parámetros similares, se puede apreciar inmediatamente el perfil recalculado del edificio.

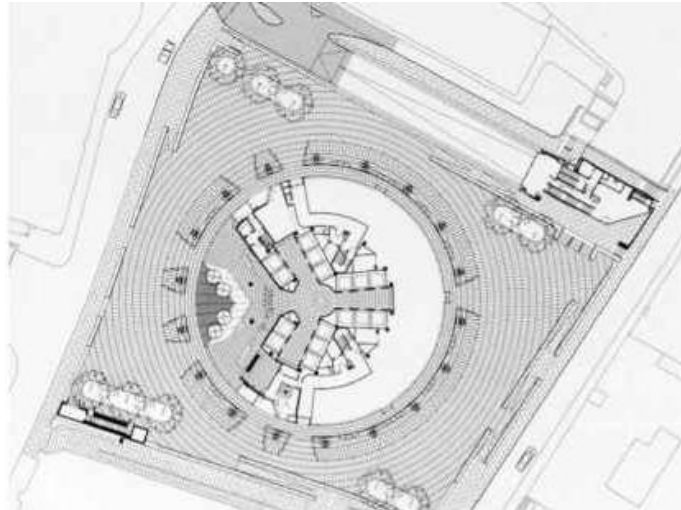


FIGURA 41. Planta de conjunto

Francis Aish, ingeniero aeroespacial de profesión y actualmente asociado a Foster and Partners, describe el proceso como dos y media “D”, haciendo referencia a que los siete arcos tangenciales que forman el perfil fueron aplicados a la geometría para su sección y también se encuentran relacionados a la planta circular.



FIGURA 42. Fachada

Este es un proyecto donde de inicio se aplica la arquitectura paramétrica de manera experimental, en el cual se relaciono con una hoja de Excel, en donde se puede apreciar los cambios al momento de restablecer un valor, observándose inmediatamente los cambios efectuados, pudiendo decidir cuál es el parámetro más adecuado para el proyecto. Esto facilito que se pudiera llevar a cabo los cálculos para después construirlo.

2.3.2.3. TERMINAL DE AUTOBUS DE SAN FRANCISCO

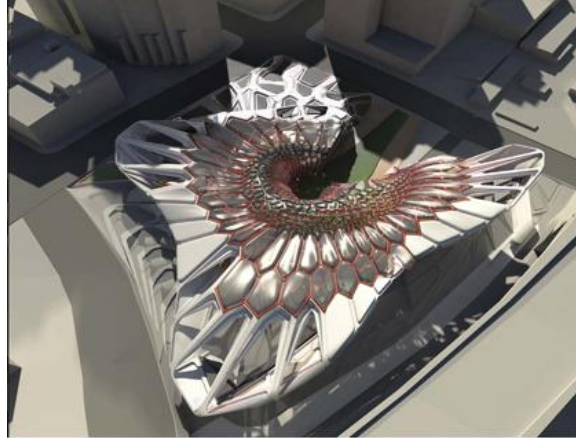


FIGURA 43. Fachada Watercube

Arquitecto: Bin Lu and Joongsik Yang

Ubicación: San Francisco, Estados Unidos

Año de Proyecto: 2009

Tipo de proyecto: Experimental

Destino: Terminal de autobús

Institución: SCI - Arc

Este proyecto para una nueva terminal de autobuses cerca de la bahía de San Francisco, el puente fue concebido como una investigación sobre el diseño paramétrico y los algoritmos de Voronoi. El proyecto fue desarrollado por Bin Lu y Yang Joongsik en el Instituto de Arquitectura del Sur de California (SCI-Arc) como una estrategia urbana que tenga en cuenta las secuencias de comandos, el diseño paramétrico y tecnologías sostenibles como una herramienta de diseño que

produce la forma a través del análisis de medio ambiente, urbano , y los datos económicos.

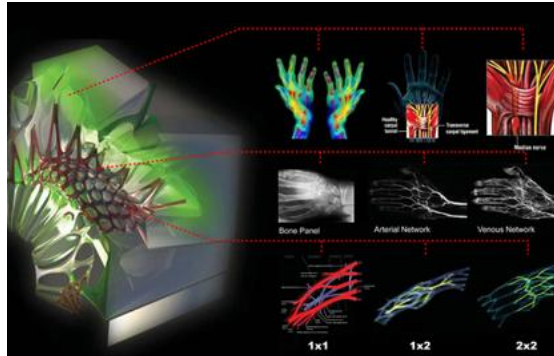


FIGURA 44. Tetracaidecaedro (izquierda); Dodecaedro pentagonal irregular (derecha); Cluster base Weaire-Phelan

Cuando comenzamos este proyecto, estamos buscando una especie de nuevo tipo de centro de tránsito. A pesar de que por lo general la terminal de autobuses tienen flujos complejos de transporte y peatones, pensamos que la terminal de autobuses convencionales no tienen ese tipo de imágenes. Y nos imaginamos la clase de sistemas centralizados que apoyan el área de la bahía que rodea la zona de espera. Por lo tanto tratamos de encontrar una especie de geometría, que es centralizada y con los flujos con la práctica scriping.

Durante el ejercicio, se encontró algún tipo de diagrama que muestra la proliferación de las células. Pensamos que la proliferación de las células es muy similar a las imágenes del sistema, y pensamos que este tipo de geometría puede ser la forma que absorben y hacia fuera de los flujos entre la terminal y área urbana. Y en segundo lugar, se aplicó una tecnología sostenible, "alga

technology“ usando la producción de biocombustibles y el oxígeno por la proliferación de algas.

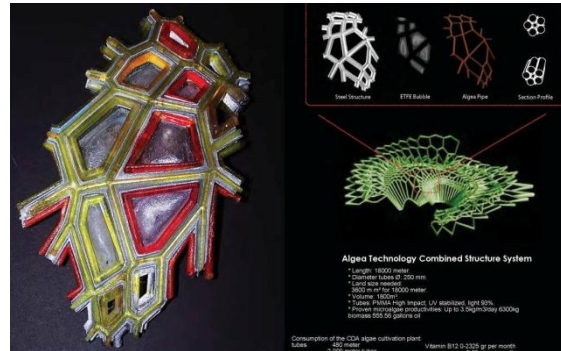


FIGURA 45. Seccionamiento del cluster Weaire-Phelan

Los arquitectos utilizaron patrones de Voronoi que analizaron la corriente principal de las personas que llegan a la estación de autobuses desde diferentes direcciones en varios puntos en el tiempo.

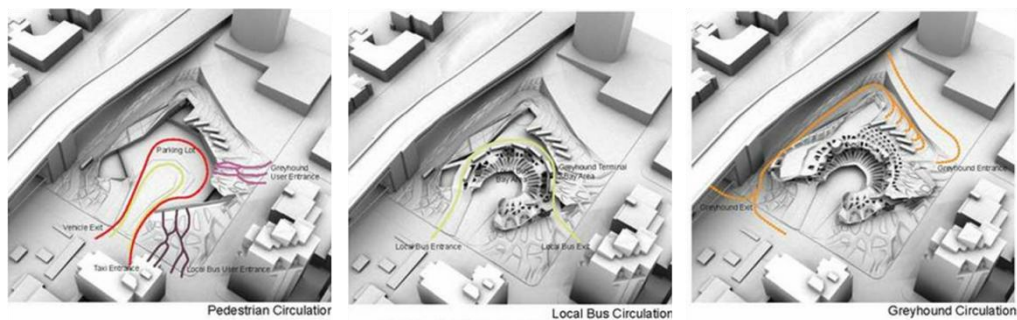


FIGURA 46. Proceso analítico sobre el comportamiento de la forma resultante.

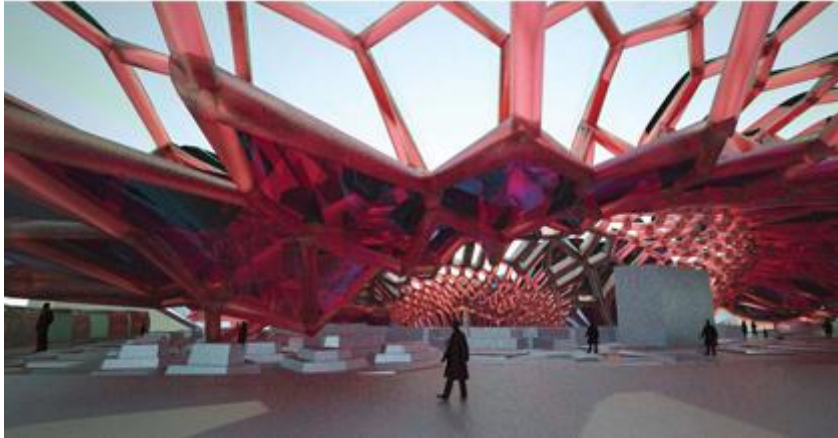


FIGURA 47. El resultado es una estructura de árbol con un modelo de celular que se abre al cielo permitiendo el paso de la luz solar dirigiendo a los visitantes a vistas específicas.

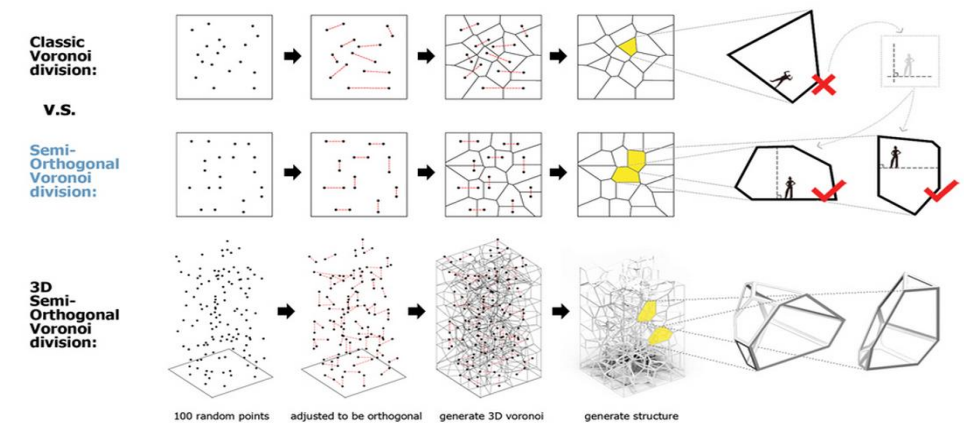
2.3.3. Matriz comparativa



VERTICAL VILLAGE

Diseño paramétrico por computadora

- Distribución de espacios haciendo uso del diagrama de Voronoi
- Uso de software: Diseño
- Diseño experimental.



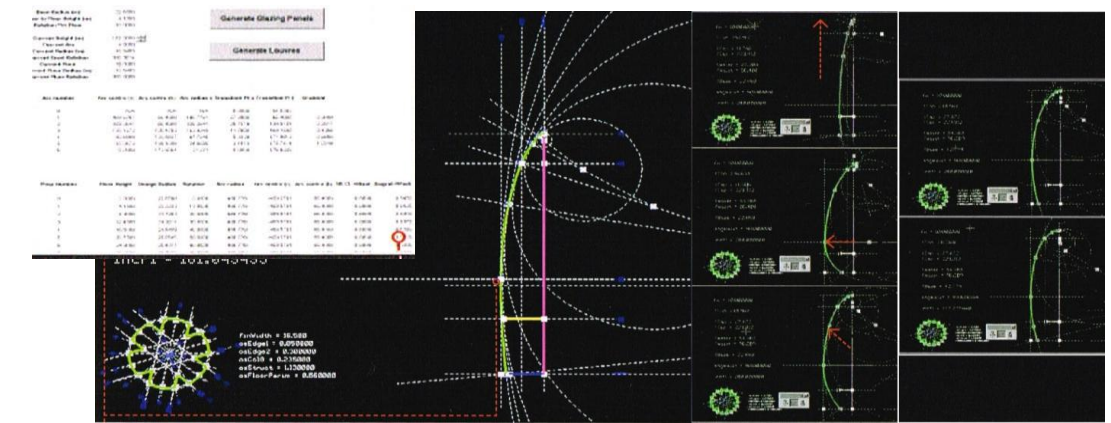
Proceso de diseño: Materializa espacios creados a partir de algoritmos computacionales (Voronoi) y los manipula de tal manera que sean habitables.



SWISS RE TOWER

Diseño paramétrico por computadora

- Forma del edificio diseñada con cálculos en Excel.
- Uso de software: Diseño, calculo y construcción.
- Proceso de manufactura ligado al proceso de diseño



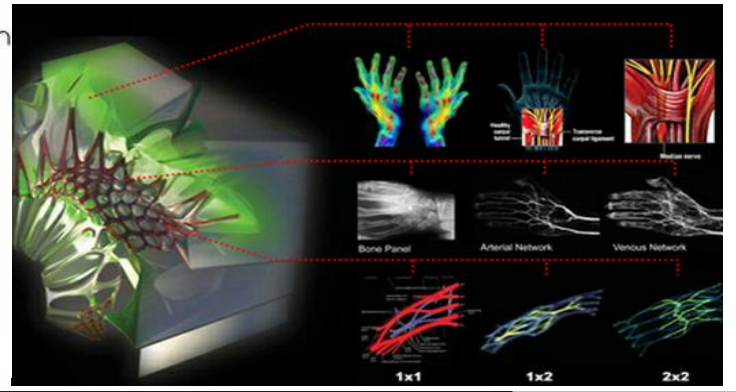
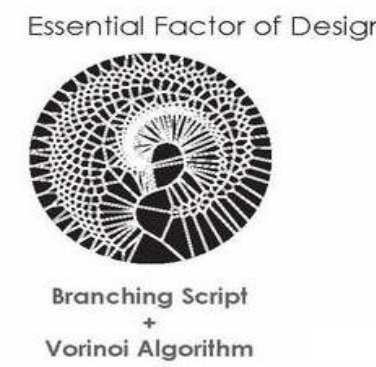
Proceso de diseño: Mediante el software de Mircostation se hace una visualización del objeto paramétrico tomando datos de una simple hoja de Excel experimentando los cambios en tiempo real.



SAN FRANCISCO'S BUS TERMINAL

Diseño paramétrico por computadora

- Forma del edificio diseñada con cálculos en Excel.
- Uso de software: Diseño
- Diseño experimental.



Proceso de diseño: Los arquitectos utilizaron patrones de Voronoi que analizaron la corriente principal de las personas que llegan a la estación de autobuses desde diferentes direcciones en varios puntos en el tiempo

CAPÍTULO III. CASO DE APLICACIÓN

3.1. SELECCIÓN DE CASO DE APLICACIÓN

Es importante elegir un tipo de objeto arquitectónico adecuado que pueda obtener un beneficio, tanto utilitario como funcional, a partir de la aplicación del diseño paramétrico con diagramas de Voronoi, ya que para poder establecer las variables fundamentales del proceso, estas mismas deben corresponder a dicho objeto.

Actualmente los diagramas de Voronoi son populares en la arquitectura en el campo experimental; estos ejercicios van desde la creación de llamativos fractales que adornan los planos bidimensionales en un volumen, hasta la creación de objetos tridimensionales complejos con múltiples espacios internos perfectamente delimitados. Un ejemplo claro en cuanto a la dependencia de las variables con respecto al objeto de estudio puede apreciarse en un proyecto de estudiantes en Sci-Arc, el cual propone una nueva estación de autobuses en San Francisco²⁴; para la obtención de parámetros, los arquitectos analizaron el flujo principal de gente que asiste a una central de autobuses a partir de distintas direcciones en varios puntos al mismo tiempo, obteniendo coordenadas que más adelante darían

²⁴ San Francisco's Bus Terminal is an Investigation on Parametric Design and Voronoi Algorithms. Recuperado el 22 de Abril de 2012, de <http://www.evolo.us/architecture/san-franciscos-bus-terminal-is-an-investigation-on-parametric-design-and-voronoi-algorithms/>

como resultado una estructura con gran similitud a las que se encuentran en la naturaleza. Aplicada en arquitectura, la forma provoca los recorridos que unen a los usuarios con puntos específicos de interés, o de importancia, en una trayectoria ideal, optimizándose la distancia que existe entre ambos, esto gracias a que la forma y la actividad se convierten en fenómenos codependientes entre si y su representación se traduce a través de variables o parámetros.

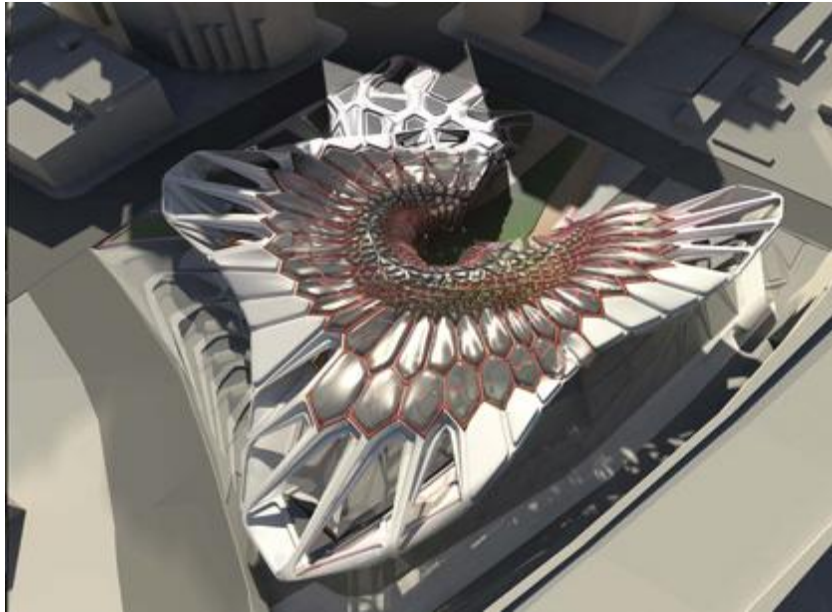


FIGURA 48. El proyecto de una terminal de autobuses en San Francisco es resultado de una investigación sobre diseño paramétrico y algoritmos de Voronoi.

Coincidiendo con el caso anterior, la sociedad de estos días demanda aprovechar el tiempo realizando un mayor número de actividades. De ahí nace la necesidad de la cercanía, donde tanto el diagrama Voronoi como el diagrama de Delaunay se vuelven herramientas útiles, sin embargo aún falta determinar el tipo de actividad en la que se enfocarán.

Rem Koolhaas en su libro *Mutaciones* afirma que, ir de compras es la última forma de actividad pública que queda²⁵, sustituyendo a casi todos los aspectos de la vida urbana. El fenómeno consumista que se vive a raíz de la globalización persigue a los consumidores y es de este modo cómo se experimenta la ciudad actual. Con base a dicha afirmación se procede a proponer un espacio de actividad pública con características comerciales, recreativas y de esparcimiento, las cuales se presentan como una solución contemporánea a las necesidades de espacios que actualmente se están dando en plazas y centros comerciales.

Al analizar la relación usuario – edificio que existe en un centro comercial, se puede apreciar que cuando se quiere comprar algo, la mayoría piensa en el lugar más cercano para adquirir lo deseado, sin embargo, este desplazamiento puede ser optimizado en lugar de establecer una distribución lineal donde los locales van perdiendo notoriedad conforme se alejan de los puntos de acceso. Con uso del método Voronoi, se puede obtener una partición del espacio que permita recorridos más cortos y una mejor relación entre locales, en donde el usuario al salir de alguno de ellos, puede verse rodeado de más opciones que lo inviten a acceder sin mayor esfuerzo, produciendo un recorrido de descubrimiento continuo.

Una vez definido el proyecto a realizar, se procede a la selección de un terreno adecuado que sea útil de manera comercial y cuente con características que se beneficien de la utilización del método de diseño.

3.2. SELECCIÓN DE TERRENO

Para el diseño de un edificio es de gran importancia conocer el terreno en donde se va a establecer. Para este fin, es necesario que el terreno cuente con la ubicación, dimensiones y forma adecuada para su correcta utilización en el método de diseño que se propone.

²⁵ Koolhaas, Rem. *Mutaciones*. 2001. Barcelona, ACTAR, 2001, p. 125.

3.2.1. UBICACIÓN DEL TERRENO

El terreno debe estar ubicado preferentemente dentro de algún corredor o zona comercial y contar con este tipo de uso de suelo, además de estar cerca de calles que faciliten su acceso y no comprometan la comodidad de los usuarios.

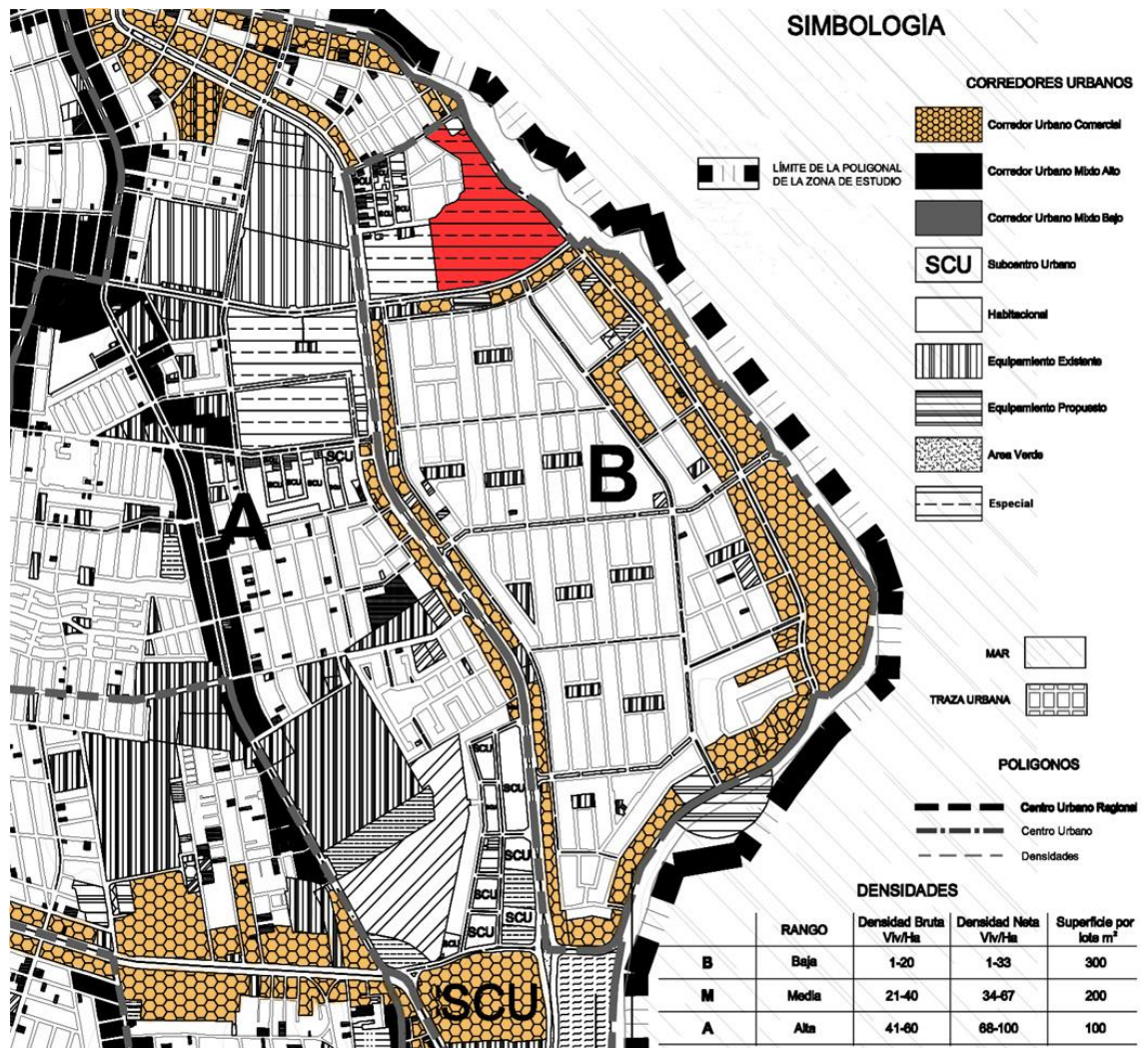


FIGURA 49. El terreno (rojo) se ubica dentro de un corredor comercial (amarillo)

El terreno propuesto se encuentra ubicado dentro de un importante corredor comercial en la zona conurbada Veracruz-Boca del Rio en la intersección del Blvd. Manuel Ávila Camacho y la avenida SS. Juan Pablo II.



FIGURA 50. Ubicación del terreno

3.2.2. DIMENSIONES DEL TERRENO

El terreno cuenta con una superficie de 123,000 m², una extensión adecuada para desarrollar el sistema aplicado a un espacio de actividad pública con características comerciales, recreativas y de esparcimiento.

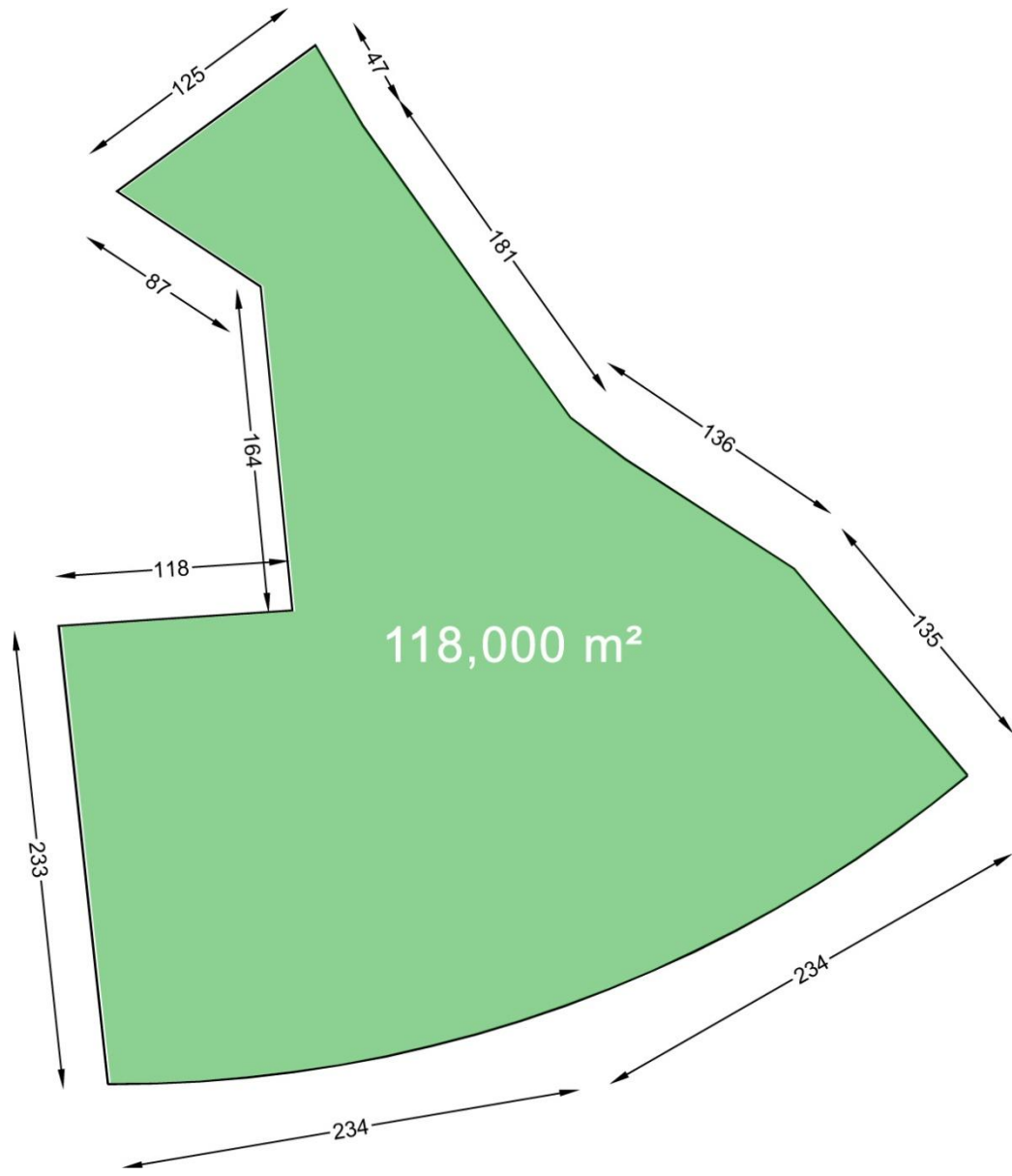


FIGURA 51. Dimensiones del terreno

3.2.3. FORMA DEL TERRENO

A veces se encuentran formas irregulares donde resulta difícil distribuir espacios y se opta por conseguir una configuración rectangular que simplifique el proceso de diseño. Utilizar el método Voronoi para dividir un polígono rectangular a partir de sus vértices, equivale a dividirlo por la mitad de sus aristas como se aprecia en la figura 52, lo cual pierde los beneficios que se pueden obtener a partir de este método. Es por este motivo que se prefiere la utilización de un terreno de forma irregular que aproveche el sistema propuesto y se produzca una subdivisión a partir de sus vértices de una manera más sencilla e interesante.

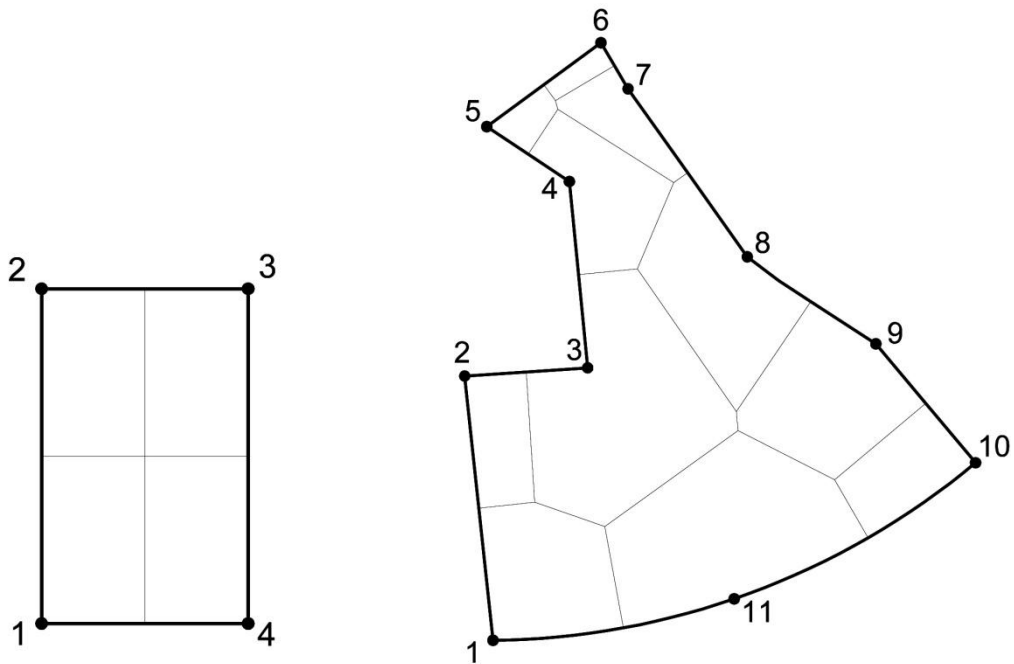


FIGURA 52. Divisiones de Voronoi de un terreno regular (izquierda) y un terreno irregular (derecha) obtenidas a partir de sus vértices.

3.3. PARAMETROS DE DISEÑO

Los parámetros son los que darán la pauta a seguir a lo largo del proceso de diseño, por lo cual es importante conocer, analizar y estudiar los fenómenos relacionados para poder establecer los límites que se requieren en el proyecto, de lo contrario la forma carecería de funcionalidad. Cabe mencionar que distribución resultante es exclusiva a la combinación de parámetros establecidos, por lo que el resultado no puede ser manipulado de forma directa a capricho, únicamente mediante la modificación de variables.

Para poder desarrollar el diagrama de Voronoi se requiere asignar puntos, estos se determinaran de acuerdo a las necesidades del proyecto. En este caso se designaron en base a los criterios que se mencionan a continuación:

3.3.1. VÉRTICES DEL POLÍGONO QUE DELIMITA AL TERRENO

La mayoría de las personas buscan consiente e inconscientemente la cercanía de las cosas, por ejemplo cuando se piensa en comprar algún producto se elige conscientemente el lugar más próximo para adquirirlo, pero visualmente también se perciben cambios en las formas que observamos las que nos dan una sensación de proximidad, como resultado se ubican los puntos más cercanos para poder acceder a algún lugar de interés.

En el polígono de un terreno en donde no se encuentra nada construido se podría decir que cualquier lugar es accesible, sin embargo, sus vértices determinan un campo de afectación de acuerdo a donde se encuentra parado el espectador que lo nota e influye en los movimientos que realiza.

Lo anterior será el primer punto de partida, ya que en un centro comercial los accesos son de vital importancia para la orientación del usuario y se deben

determinar las formas y ubicación de las zonas primarias de influencia que contiene el polígono del terreno.

El terreno irregular propuesto posee 11 vértices principales como se muestra en la figura 53 que dictaminan su forma a lo largo de segmentos de distintas dimensiones.

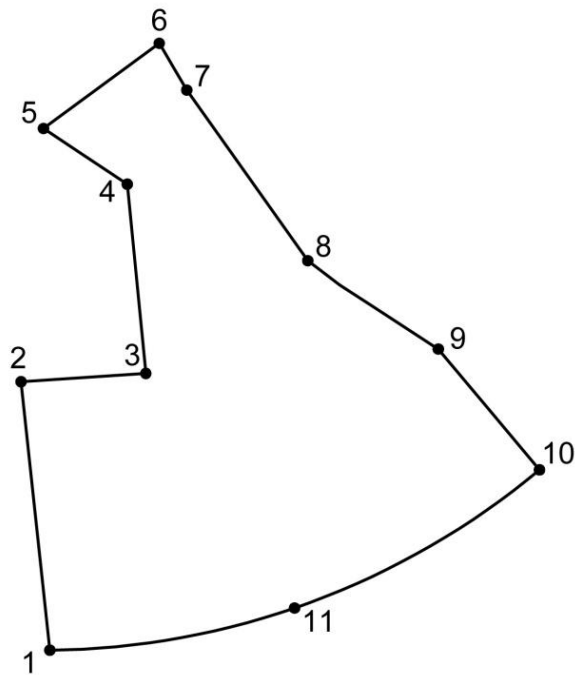


FIGURA 53. Vértices que delimitan el polígono del terreno.

Ubicar los vértices sirve para subdividir el terreno en particiones primarias, ayuda a establecer las áreas que abarcará cada acceso de tal modo que permita llegar a cada uno de los espacios internos de una manera óptima; y a su vez asigna la proporción de subdivisiones secundarias que corresponden de acuerdo al área total de la forma.

3.3.2. NUMERO DE PARTICIONES

Este valor se utiliza para subdividir el terreno en espacios más pequeños para que resulten aprovechables en distintos usos. La elección del número exacto es en base al criterio de cada proyecto en particular y en este caso se selecciona a la cantidad de usuarios que se cree que podrían visitar al edificio diariamente.

La justificación de usar al usuario como parámetro se fundamenta en que dentro de la arquitectura es uno de los parámetros clave que todos los arquitectos utilizamos al momento de generar espacios. Como se determinó que en este caso se trataría de un centro comercial, es necesario conocer la cantidad de gente que asiste a un centro comercial de dimensiones similares al que se propone y que sus ubicaciones dentro del terreno en un determinado momento, representen los vértices que generarán las particiones.

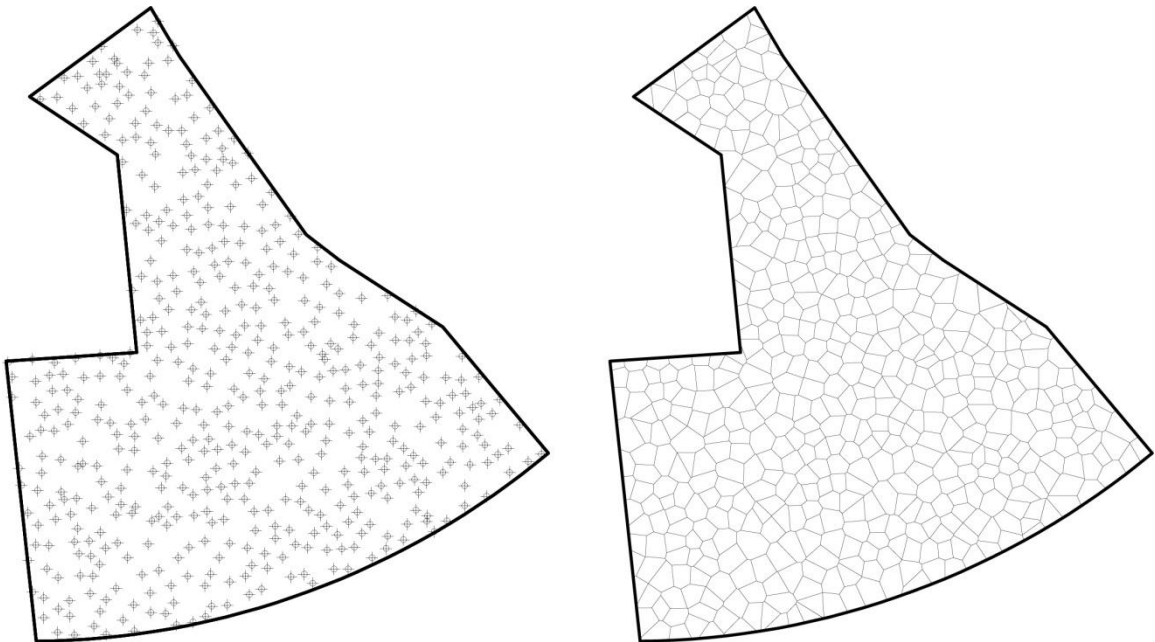


FIGURA 54. El número de particiones corresponde a la cantidad de puntos ubicados dentro del terreno

Para asignar este segundo parámetro se requiere saber el número promedio de usuarios que podrían asistir al edificio. En este caso se toma como referencia el centro comercial más significativo de la zona, Plaza las Américas, que manifestaron tener un promedio diario de asistencia de 500 personas, siendo este valor, el siguiente parámetro para desarrollar el sistema. Cada persona representará la ubicación de un punto dentro del terreno en un momento determinado, lo cual sirve como base para crear un diagrama de Voronoi que particione la superficie en la misma cantidad de espacios como se aprecia en la figura 54.

3.3.3. TOLERANCIA PERMISIBLE ENTRE LOS VÉRTICES DE VORONOI

Como se dijo anteriormente, la distribución de los puntos que representan ubicaciones de personas dentro del dibujo, por lo cual, se debe considerar una distancia mínima entre ellos, esto es con el objeto de evitar espacios muy reducidos, o bien, demasiado distantes entre sí. El método de diseño que se propone, no permite conocer las características de los espacios resultantes, sino hasta una vez que se terminan de realizar los cálculos. Esta paradoja permite hacer conjeturas de que es lo que se alojará dentro de esos espacios, aplicándose un valor de referencia a criterio del arquitecto y que corresponda con el tipo de proyecto que se realice.

Tabla 1. Longitud de pasillos principales de centros comerciales en Veracruz.

Centro Comercial	Longitud
Plaza Cristal	9
Plaza Mocambo	10
Plaza las Américas	10
Plaza las Palmas	9
Plaza del Puerto	10

Para establecer el valor a emplear dentro del método de diseño, se hace en base a un análisis realizado a las circulaciones internas de los centros comerciales más representativos de la ciudad de Veracruz. En la tabla 1 se observa una frecuencia predominante de 10 metros en la longitud que presentan los pasillos principales de cada edificio. Dicho valor tiene la flexibilidad tanto de resolver una circulación adecuada, como también de albergar un local comercial e incluso permitir el paso de vehículos en ambos sentidos, con banquetas a sus extremos.

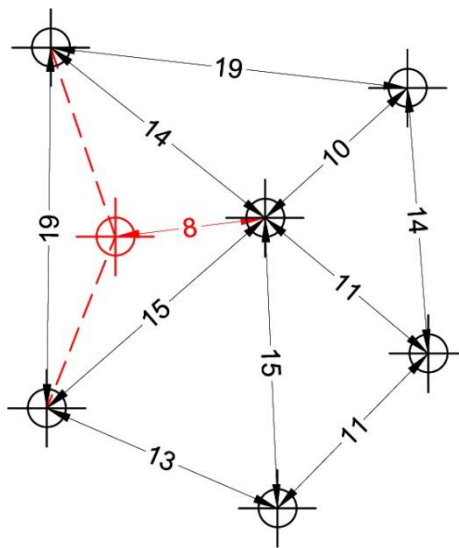


FIGURA 55. Los vértices de Voronoi que presentan una separación menor a 10 metros se descartan.

Como se representa en la figura 55, al utilizar un valor de referencia de 10 metros, cualquier longitud menor a este se elimina automáticamente.

3.3.4. CRITERIO DE AGRUPAMIENTO DE AREAS DE VORONOI

Una vez que se obtiene el diagrama de Voronoi general del terreno, se deben ubicar las relaciones que presentan las áreas entre sí. Los vértices forman grupos

geoméricamente naturales de acuerdo al espacio relativo que existe entre sus vecinos más cercanos; los grupos cuya cercanía sea menor al doble de la tolerancia permisible entre los vértices de Voronoi, 20 metros en este caso, se convertirán en agrupamientos de locales los cuales identificaremos en lo siguiente como, clusters, los cuales requieren como mínimo la combinación de 3 puntos cercanos, mientras que los vértices restantes unidos secuencialmente formaran cadenas que representan trayectorias en los pasillos que los unen.

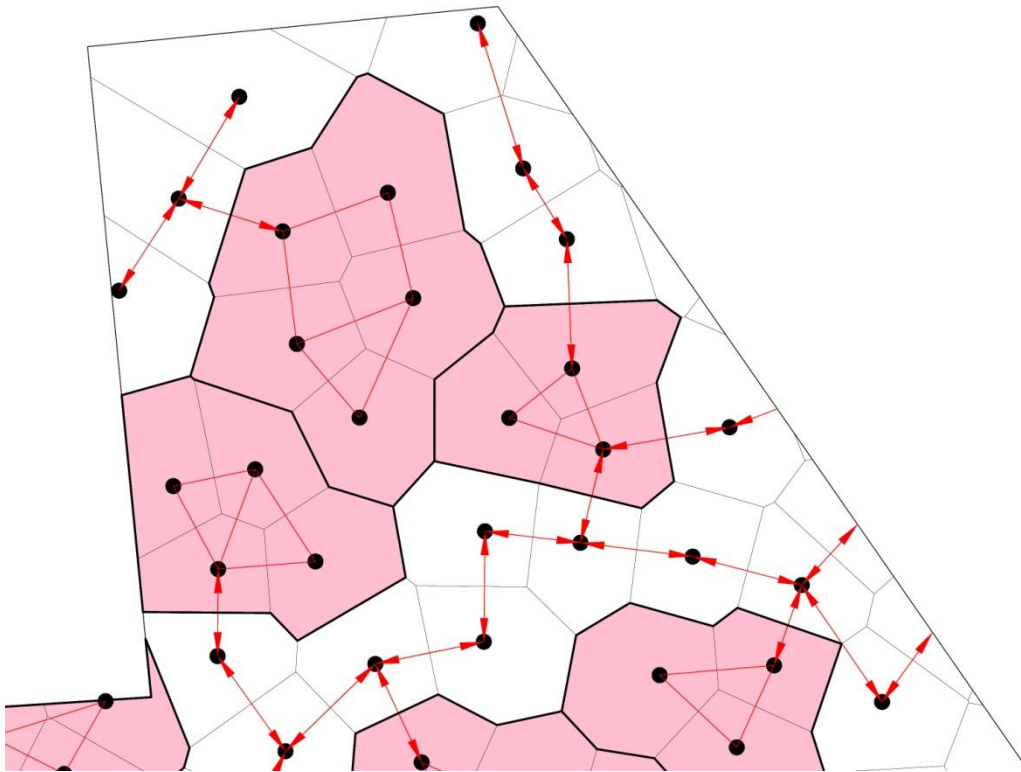


FIGURA 56. Representación de clusters (3 o más puntos cercanos) y las cadenas que forman los pasillos de interconexión de espacios

La elección del número 20 como parámetro de agrupamiento, encuentra su explicación en que realmente se trata de la duplicación del parámetro que se explicó en el apartado 3.3.3; es decir, si los vértices no pueden estar más cerca de

10 metros entre sí, cualquier valor debajo del 10 resultaría inservible ya que no existe ningún segmento de dicha longitud.

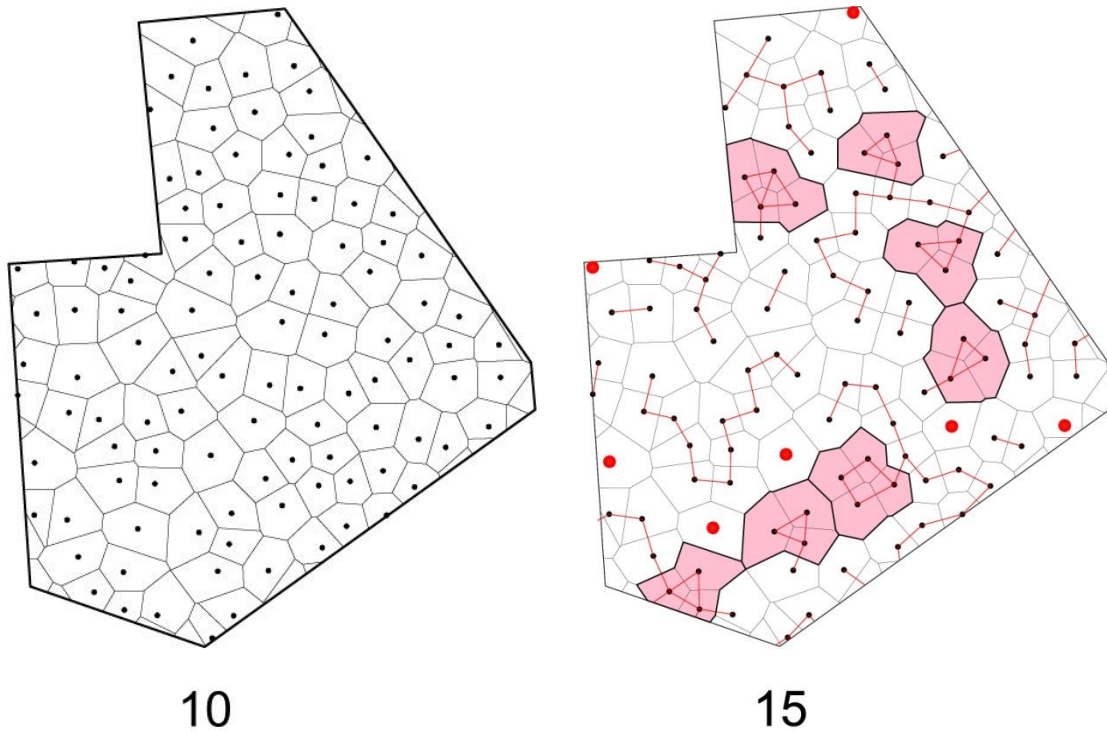


FIGURA 57. Agrupaciones resultantes a partir de la utilización de parámetros de 10 y 15 respectivamente.

En la figura 57 izquierda se ejemplifica cómo cualquier valor igual o menor que 10 no se presenta en la distancia entre vértices, por lo que no se produce ningún cluster o cadena. En la misma figura, a la derecha, se puede observar que si se incrementa el valor de 10 a 15, comienzan a aparecer clusters y cadenas, sin embargo, el parámetro aún puede ser optimizado ya que se presentan varios vértices, marcados como puntos rojos, que carecen de conexión con algún otro.

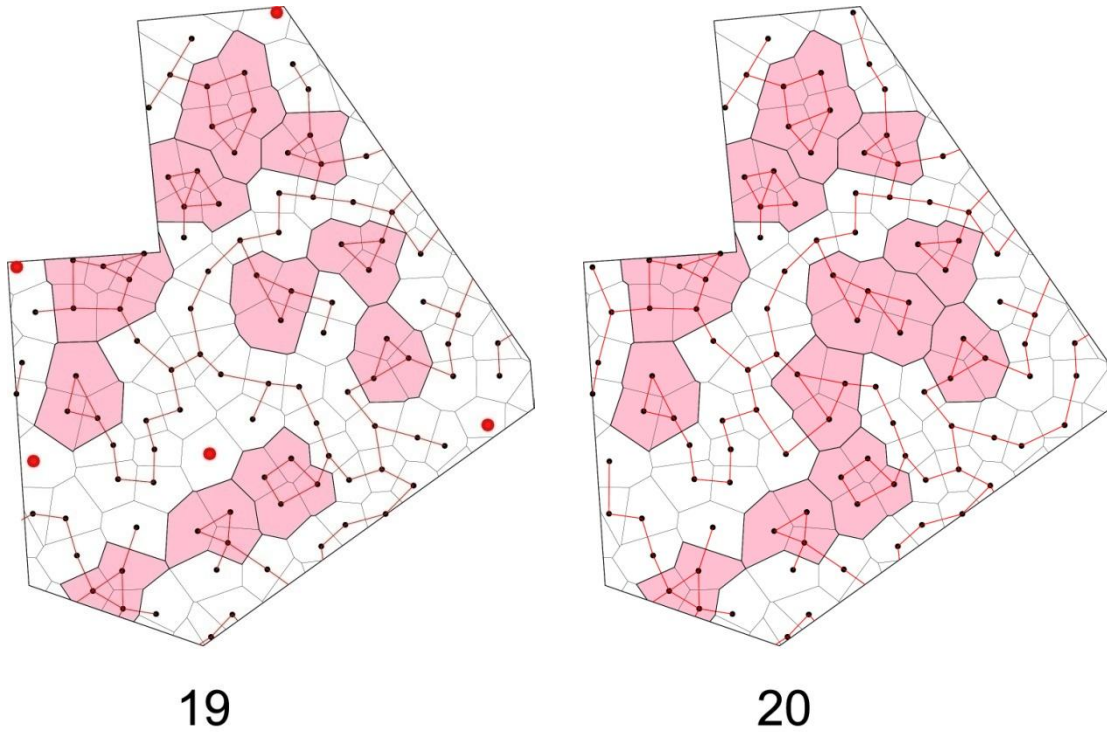


FIGURA 58. Agrupaciones resultantes a partir de la utilización de parámetros de 19 y 20 respectivamente.

En la Figura 58 se puede apreciar que si se eleva el valor hasta 19, se incrementan la cantidad de conexiones que forman clusters y cadenas, aunque aún quedan vértices sin utilizarse. Por este motivo se concluye que el valor de 20 consigue llegar a producir clusters y cadenas de una manera óptima, haciendo uso de todos los vértices.

3.3.5. ALTURA DE LOS CLUSTERS

Este valor se fundamenta en la obtención de dimensiones recomendadas para edificios de uso similar, las cuales presentan una longitud de 4 metros por nivel, suficientes para albergar instalaciones y elementos estructurales sin comprometer

la confortabilidad del usuario. Asumiendo una generalización de locales de 2 niveles, se obtiene 8m para una altura total por cluster.

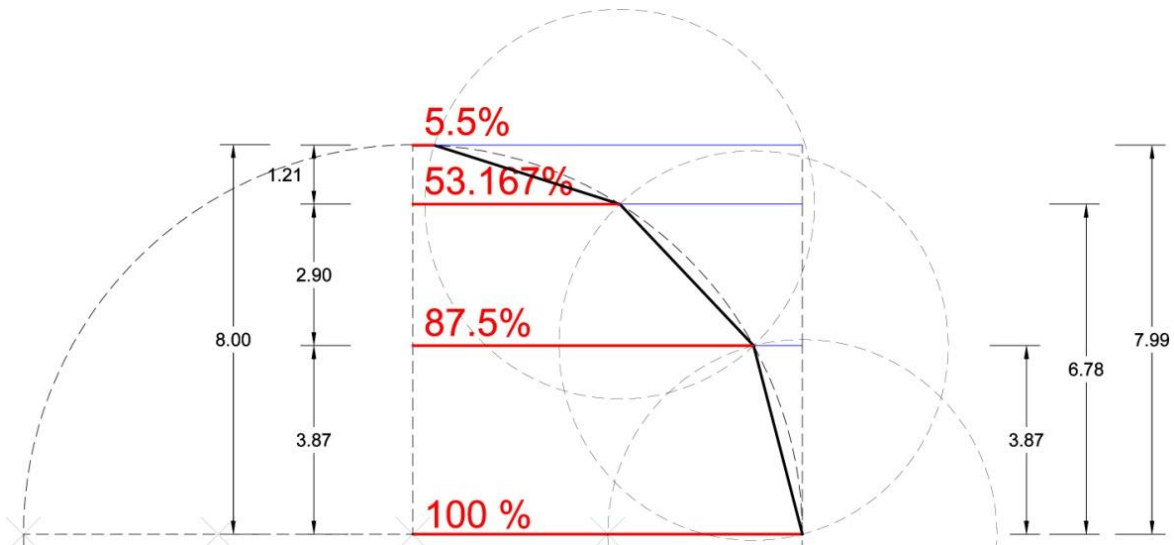


FIGURA 59. El valor de la altura también sirve para determinar la superficie interna del cluster

Los diagramas de Voronoi, al funcionar como una sección de un crecimiento esférico proporcional de una serie de puntos predeterminados, presentarían una forma de cúpula vistas en alzado. Esta forma a su vez es la que define las dimensiones de las plantas que se obtendrían para cada local. En la figura 59 se puede apreciar una sección del cluster donde se observa que las alturas determinan la reducción en la superficie utilizable. El procedimiento que segmenta la sección del cluster será detallado más adelante.

Una vez determinados los parámetros que establecen los principios fundamentales del proyecto, se procede a su implementación dentro del proceso creativo.

3.4. DESARROLLO DEL PROCESO CREATIVO

Como se mencionó en el apartado de los parámetros de diseño a utilizar, el primer paso es la ubicación de los vértices que limitan el polígono del terreno.

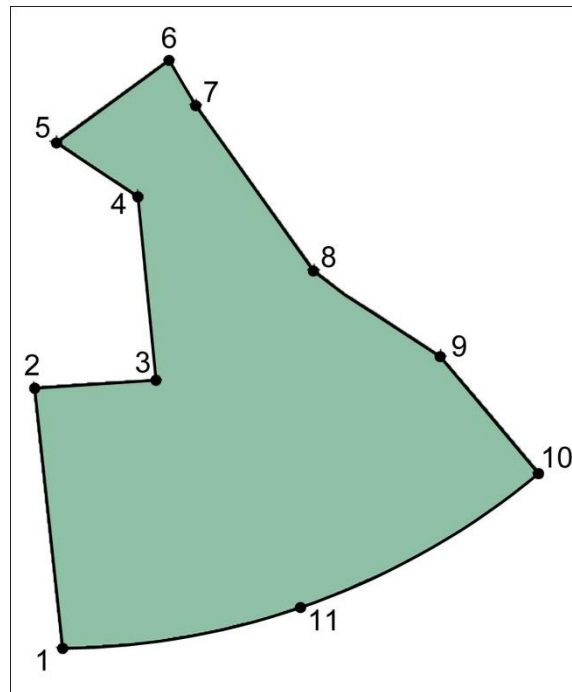


FIGURA 60. Con los vértices que limitan el polígono del terreno se puede saber su influencia dentro de la geometría del mismo.

A partir de los 11 puntos que limitan al polígono, se calcula un diagrama de Voronoi que lo segmente en 11 áreas de influencia principales.

El cálculo del diagrama se agiliza haciendo uso del programa *Rhinoceros* conjuntamente con un *plugin* llamado *Pointset reconstruction*. Con lo que se obtiene los siguientes trazos figura 61.

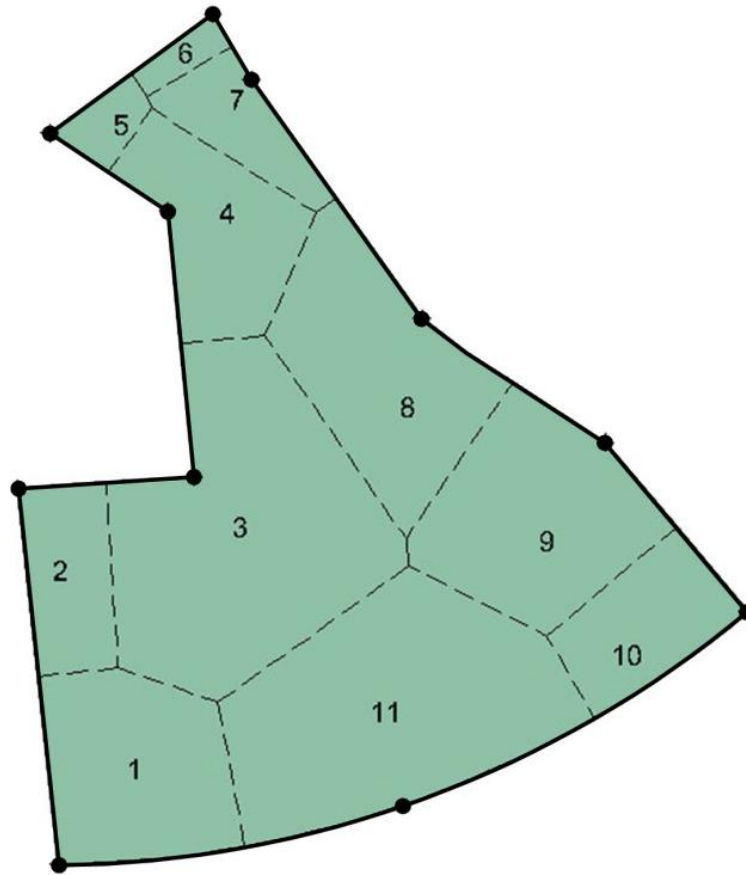


FIGURA 61. Principales áreas de influencia dentro del polígono del terreno

Las áreas de influencia principales tienen 2 usos importantes: el primer uso corresponde a la ubicación de los accesos, es decir, por cada área deberá existir al menos uno de ellos, pudiendo ser peatonal o vehicular. Tomando en consideración las colindancias del terreno y las vías principales que lo rodean, únicamente se utilizan las áreas 1, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

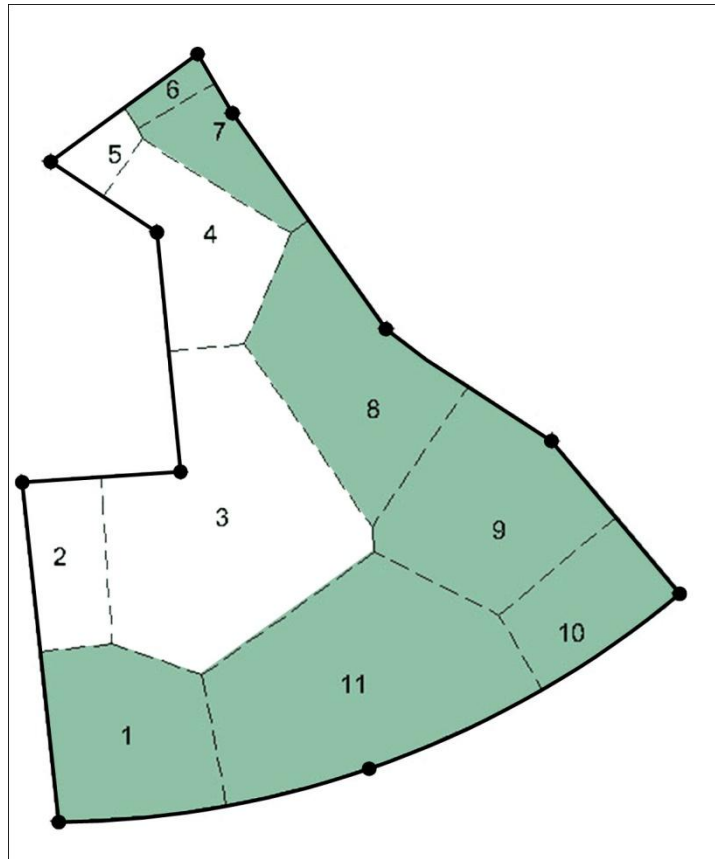


FIGURA 62. Áreas donde posteriormente se ubicaran los accesos

El segundo uso que se le da a las áreas de influencia principales es para la creación de áreas secundarias, las cuales crean particiones dentro del terreno en superficies más pequeñas que serán utilizados como locales y andadores.

Los puntos que se utilizarán para la partición del terreno corresponden a las personas que transitarán en él. Establecer las ubicaciones exactas es algo imposible ya que cada individuo realiza su propia actividad en un momento determinado y se desplaza, lo cual trae modificaciones en las áreas de Voronoi que produce, como se puede apreciar en la FIGURA 63.

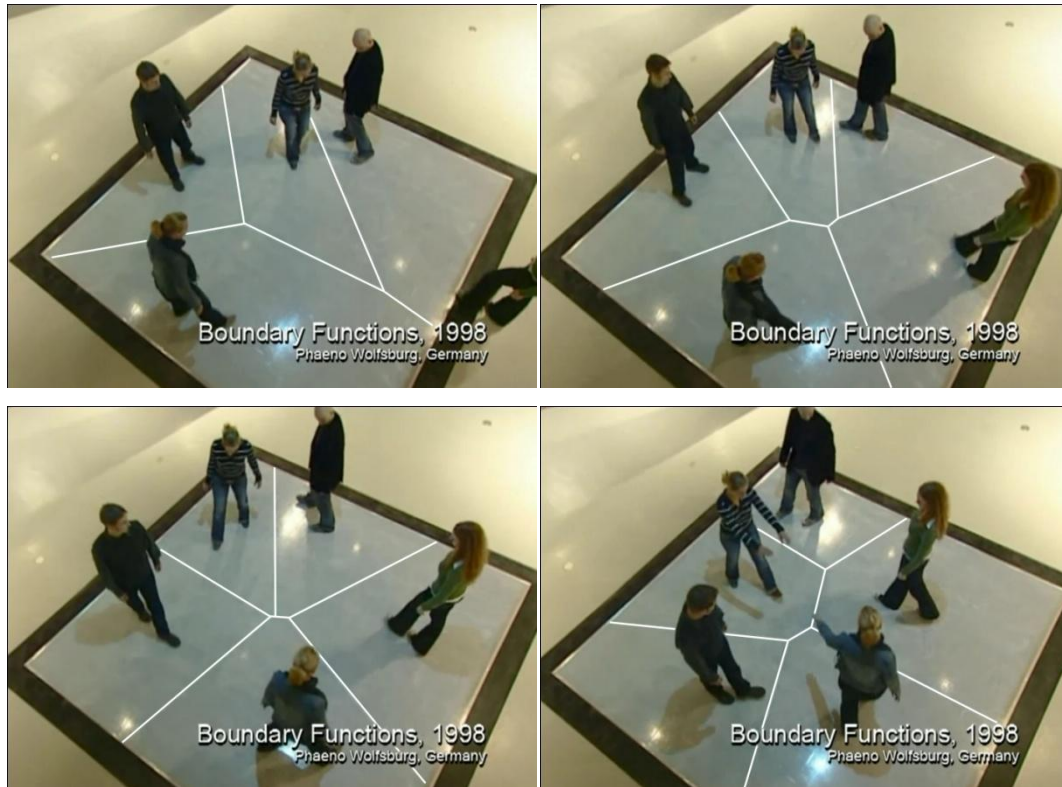


FIGURA 63. Las áreas de Voronoi que producen las personas son dependientes de una actividad y momento determinado

Es por este motivo que se elige insertar puntos aleatoriamente dentro de cada zona respetando las siguientes reglas:

- Se consideran 500 puntos en total, representando al promedio diario de visitantes que tiene un centro comercial de similar tamaño en la ciudad.
- Los puntos no deben encontrarse a menos de 10 m de distancia entre si dentro de la misma zona.
- La cantidad de puntos se calcula y ubican proporcionalmente de acuerdo a la superficie de cada zona, asignando los siguientes a cada una de ellas:

Tabla 2. Total de puntos por zonas.

Zona	%	Particiones	Area (m ²)
	100%	500	123,000
1	10%	51	12,546
2	5%	25	6,150
3	21%	106	26,076
4	8%	39	9,594
5	2%	8	1,968
6	1%	5	1,230
7	4%	20	4,920
8	12%	60	14,760
9	12%	60	14,760
10	6%	29	7,134
11	19%	97	23,862

La inserción de puntos se realiza haciendo uso del programa *Rhinoceros* conjuntamente con un *plugin* llamado *Rhino Scatter*, el cual es una herramienta que coloca puntos aleatorios en el área que se seleccione y a la distancia mínima requerida. Es importante mencionar que la segmentación del terreno en 11 zonas y la distribución proporcional de los puntos, crea una nube homogénea de estos, evitando dejar zonas muy aglomeradas o con grandes espacios en blanco, ya que no se puede introducir un parámetro que defina la distancia máxima que deben tener los puntos entre sí.

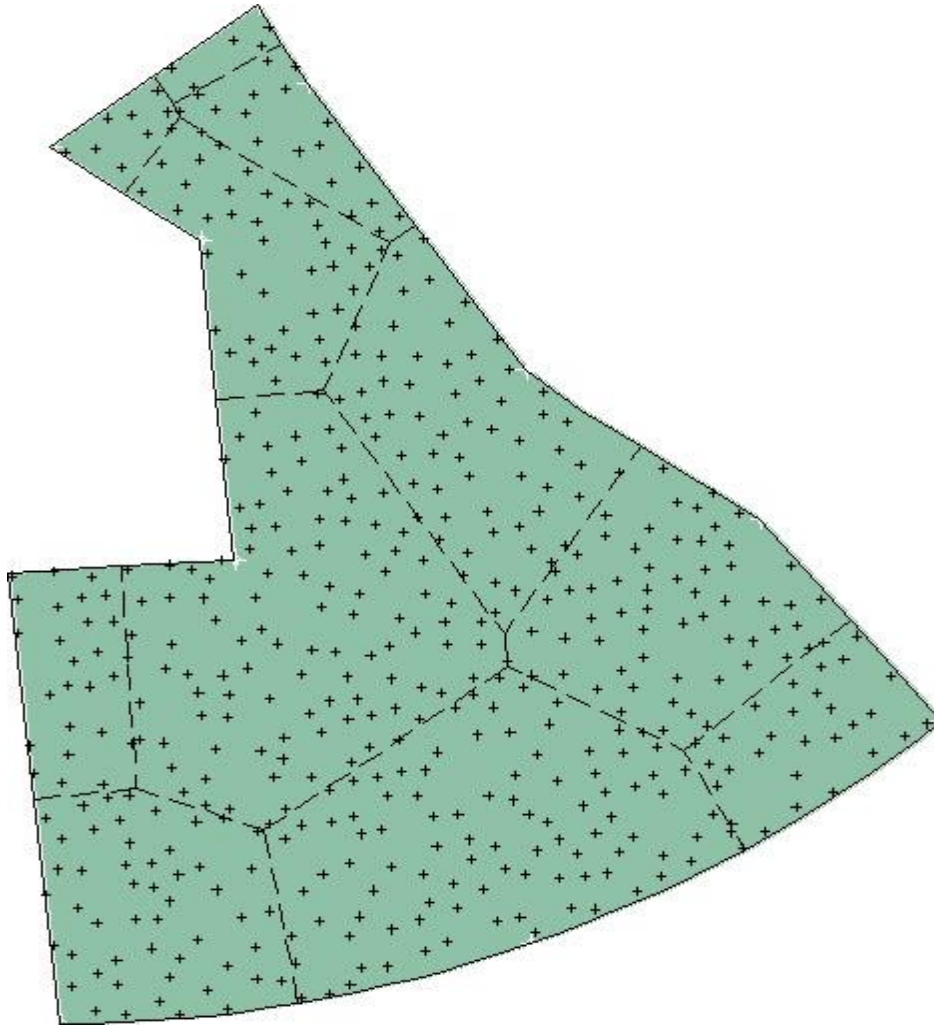


FIGURA 64. Mediante la inserción aleatoria de puntos se consiguen distribuir 500 de ellos en el total del terreno de una manera homogénea

Una vez obtenidos los puntos, se procede a calcular nuevamente áreas de Voronoi a partir de estos. Este procedimiento da como resultado 500 áreas de influencia secundarias utilizables para la distribución de espacios y como diseño de cubierta del proyecto.

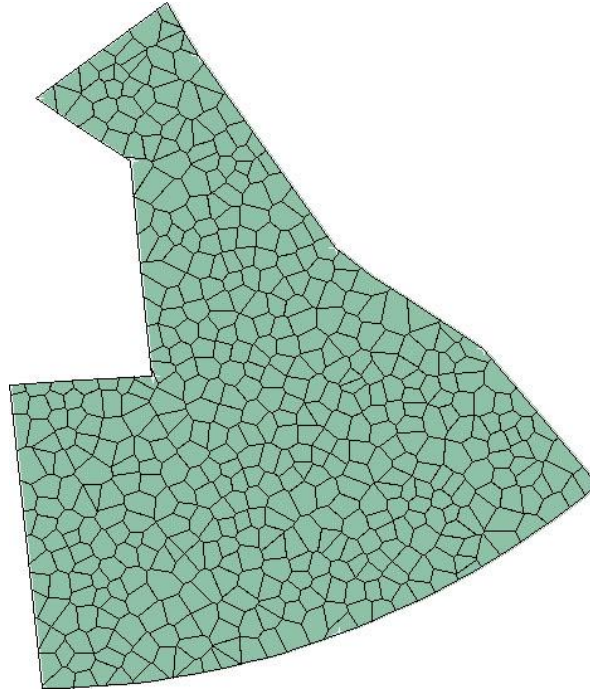


FIGURA 65. Áreas utilizables para la distribución de espacios y cubierta del proyecto

A simple vista, la imagen fractal que resulta puede decir poco de cómo puede aplicarse para la ubicación de espacios, sin embargo, haciendo uso de la correlación que guarda triangulación de Delaunay con el diagrama de Voronoi, se pueden ubicar las distancias que existen entre cada área y descartar aquellas que se alejen más allá de 20 metros.

El cálculo de las distancias se realiza nuevamente haciendo uso del programa *Rhinoceros* conjuntamente con *Pointset reconstruction* y da como resultado la representación gráfica de las trayectorias menores a 20 metros entre los polígonos.

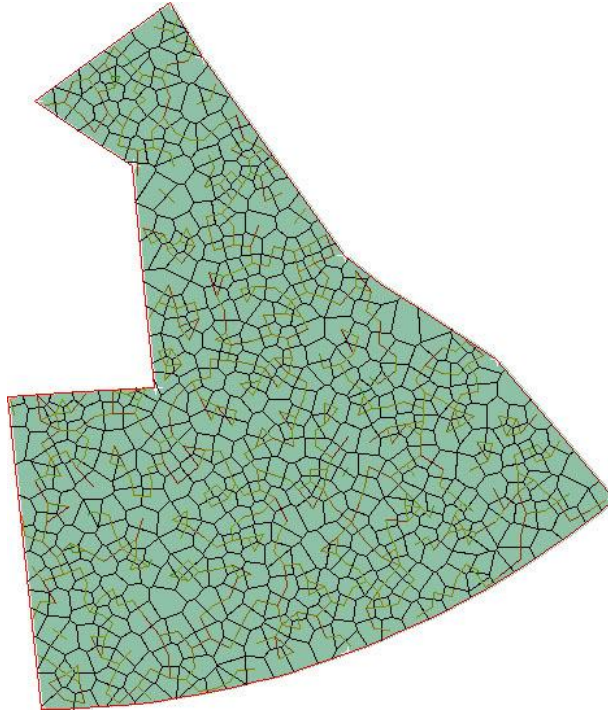


FIGURA 66. Distancias menores a 20 m dentro del polígono

Las distancias generadas pueden ser de dos formas: segmentos unidos que constituyen trayectorias y segmentos unidos entre sí que constituyen grupos.

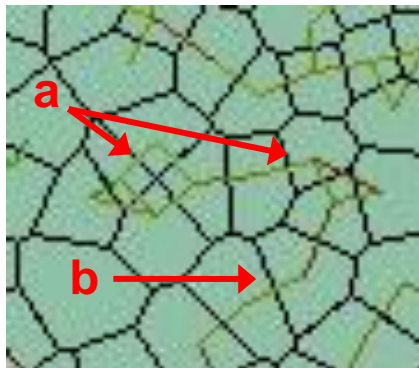


FIGURA 67. Grupos (a) y Trayectorias (b) localizados dentro del polígono

El producto de los cálculos realizados en *Rhino* se exporta a *AutoCAD* para ser depurados y utilizados como parte del proyecto. Con estos datos se pueden determinar las áreas de circulación, locales y estacionamientos.

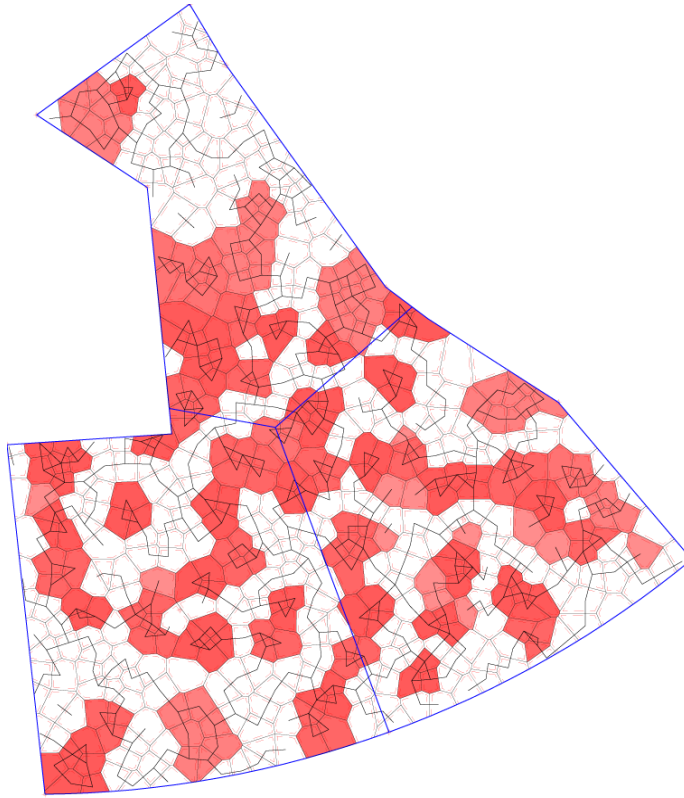


FIGURA 68. En *AutoCAD* se resaltan los grupos localizados

Para determinar los locales hay que considerar que no colinden con los límites del terreno y además ubicarse un área de estacionamiento suficientemente amplia que cumpla con los requerimientos del proyecto. Esta depuración en los grupos localizados da como resultado la creación de 11 zonas de locales comerciales y 2 áreas de mayor tamaño, nacidas de los grupos más aglomerados, para el establecimiento algún tipo de tienda ancla.



FIGURA 69. Planta de distribución de locales, pasillos y estacionamiento.

Para ver como se están comportando los espacios y recorridos, se crea una maqueta experimental de la distribución de los locales con la cubierta. Como se muestra a continuación.

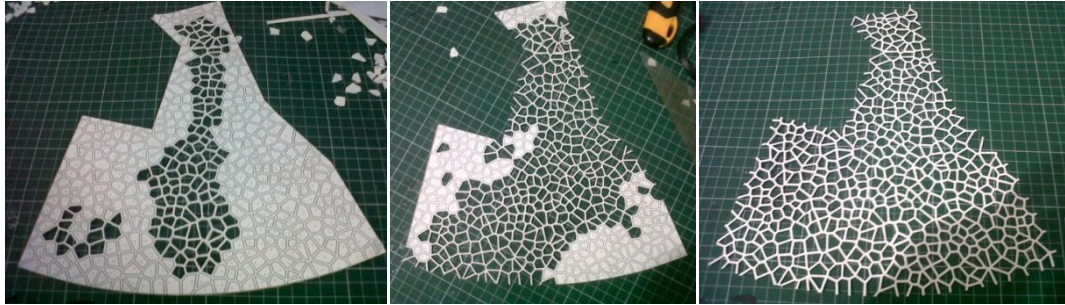


FIGURA 70. Proceso constructivo de la maqueta exploratoria de la cubierta.

En la maqueta exploratoria se pueden apreciar las zonas destinadas a locales comerciales y las zonas de circulación cubiertas mediante una estructura que guarda la forma del diagrama de Voronoi calculado.



FIGURA 71. Producto final de la maqueta exploratoria.

Al ingresar al centro comercial o al salir de un local tienes como resultado múltiples opciones para observar, debido a la forma que están integrados los pasillos.

Al demostrarse con la maqueta el funcionamiento de los espacios se procede a diseñar el área de circulación. Para integrar el piso del pasillo con la cubierta se aplican aleatoriamente los mismos 500 puntos representativos a las personas, pero esta vez únicamente a los pasillos, para calcular los polígonos de Voronoi que se generan figura 72.

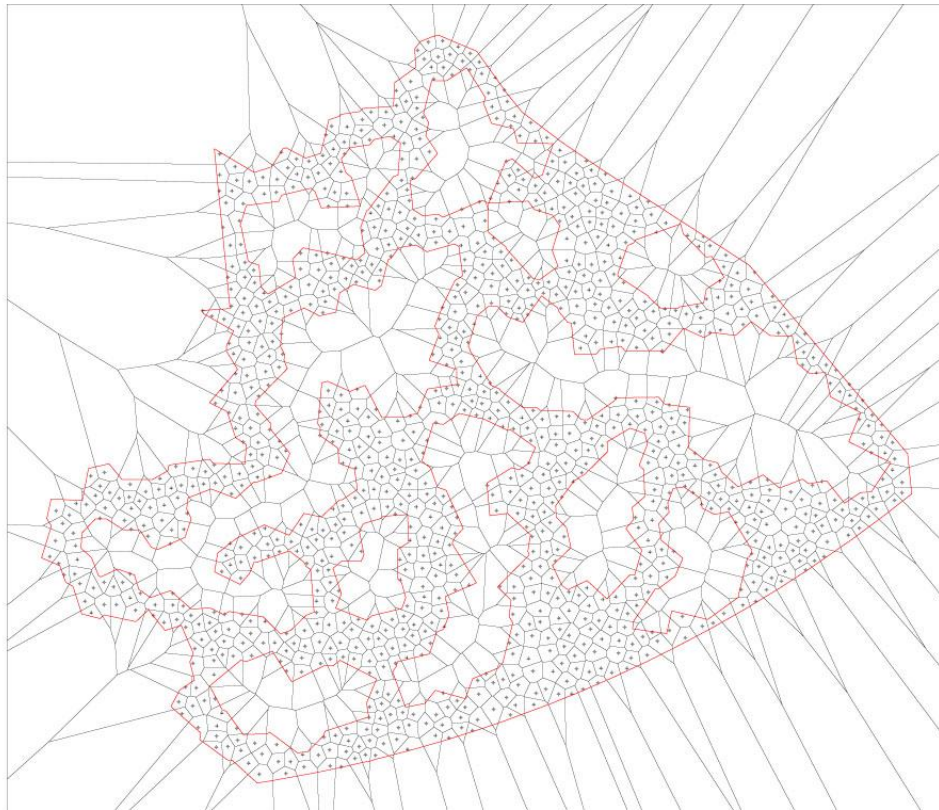


FIGURA 72. Diagrama de Voronoi a partir de la segmentación del área de circulación.

Esta segmentación se suma a la existente a la cubierta, dando como resultado divisiones en plafones y tratamientos distintos en el piso.

En el caso de la cubierta, se propone la utilización de módulos con subdivisiones que pueden ser transparentes u opacas según la zona en la que se encuentren. Gracias a la modulación que presenta, pueden ser ubicados en distintas alturas, adecuándose a la topografía del terreno.

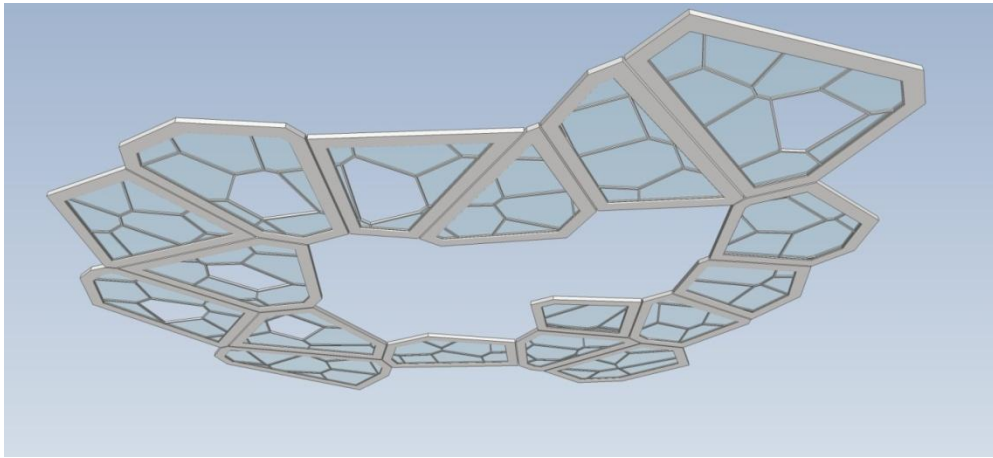


FIGURA 73. Render de la modulación de la cubierta.

El piso de los pasillos presenta la misma segmentación que la cubierta, la cual define cambios en material.

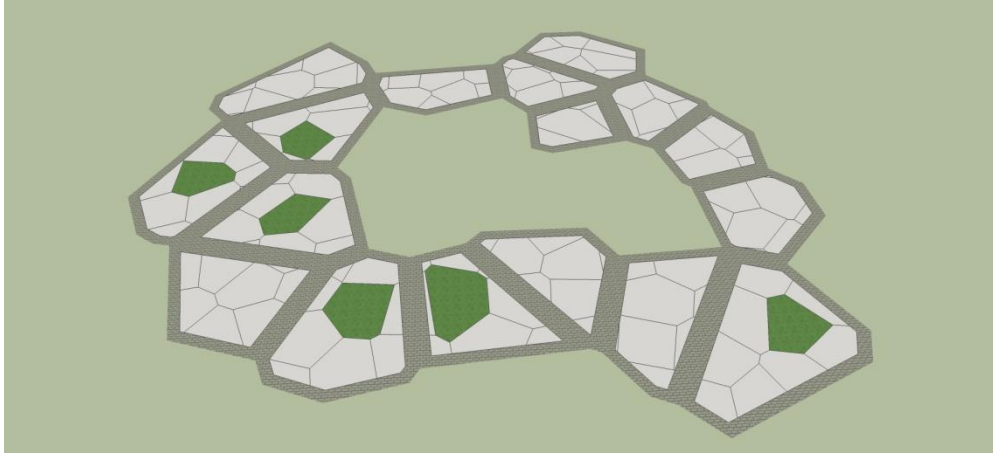


FIGURA 74. Render de la modulación del piso.

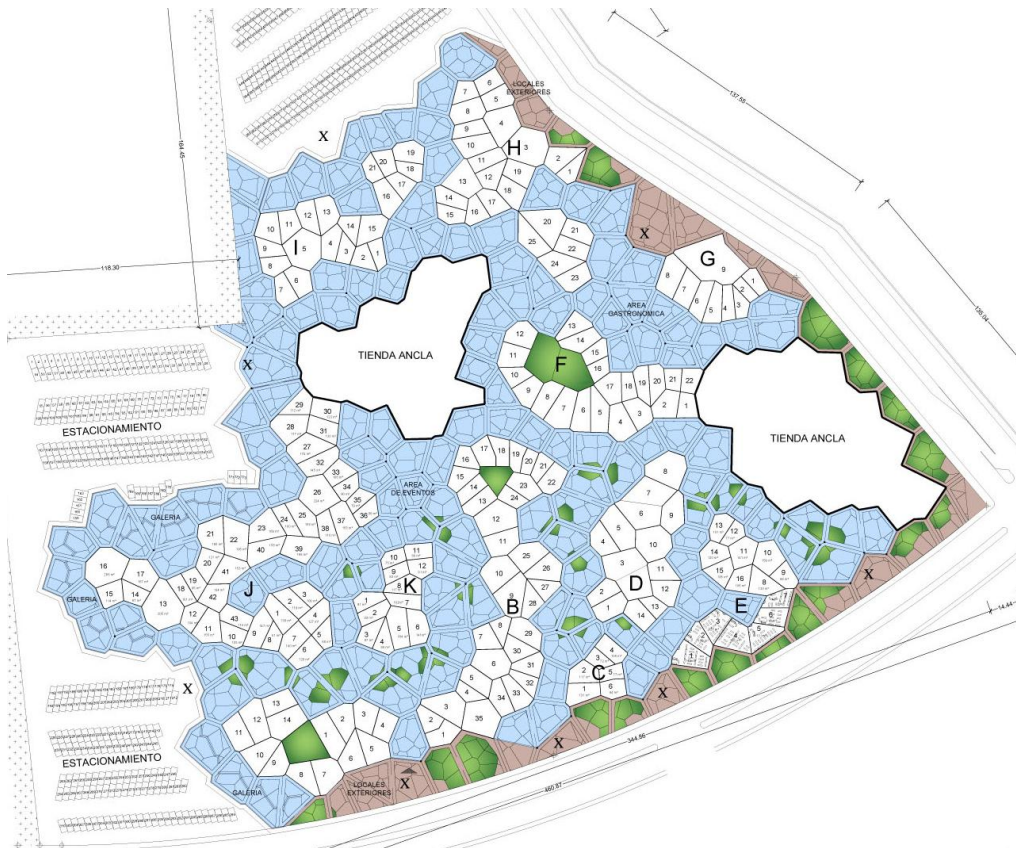


FIGURA 75. Planta de distribución con cubierta.

Una vez definidas las áreas de circulación, se realizan los volúmenes que corresponderán a los locales, cuyos límites en planta ya se encuentran definidos y solamente resta determinar su sección de acuerdo a los lineamientos constructivos.

Los diagramas de Voronoi son representaciones bidimensionales de la intersección que surge en el crecimiento radial de puntos; si visualizamos este fenómeno en tres dimensiones, se puede apreciar una forma similar a la que se presenta en la figura 76.

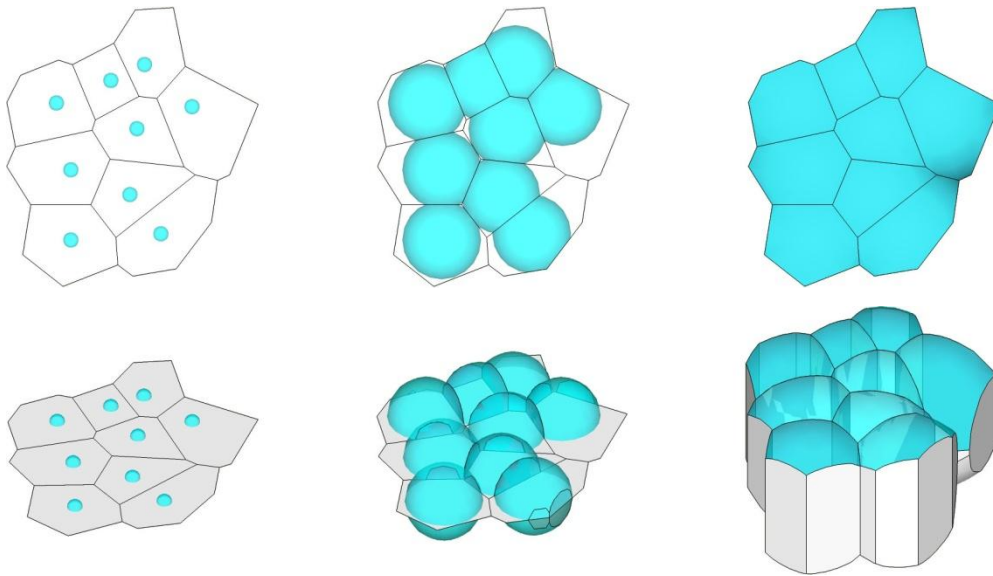


FIGURA 76. Representación tridimensional del crecimiento de vértices de Voronoi.

Proponer una forma esférica por cada local sería un proceso largo, tedioso y costoso de construir, por lo que se realiza un trazo geométrico obtenido de la razón de una circunferencia para obtener segmentos en el plano vertical.

Se toma un cuadrante de una circunferencia y se divide entre una cuarta parte del diámetro de la misma. Esta razón está sustentada en que el diámetro de una circunferencia cabe 3.1416 veces dentro de su perímetro, por lo tanto, a una cuarta parte de la circunferencia le corresponderá una cuarta parte del diámetro.

Estas divisiones al arco de la circunferencia delimitarán secciones horizontales equivalentes a niveles en planta que contempla una reducción del 87.5% de superficie para un segundo piso. Al utilizar este método que incluye porcentajes de reducción, se permite experimentar diferentes alturas deseadas, optando finalmente por un valor de 8 metros que permite alturas libres de 3.87 metros en primer nivel y de 2.90 metros en segundo nivel.

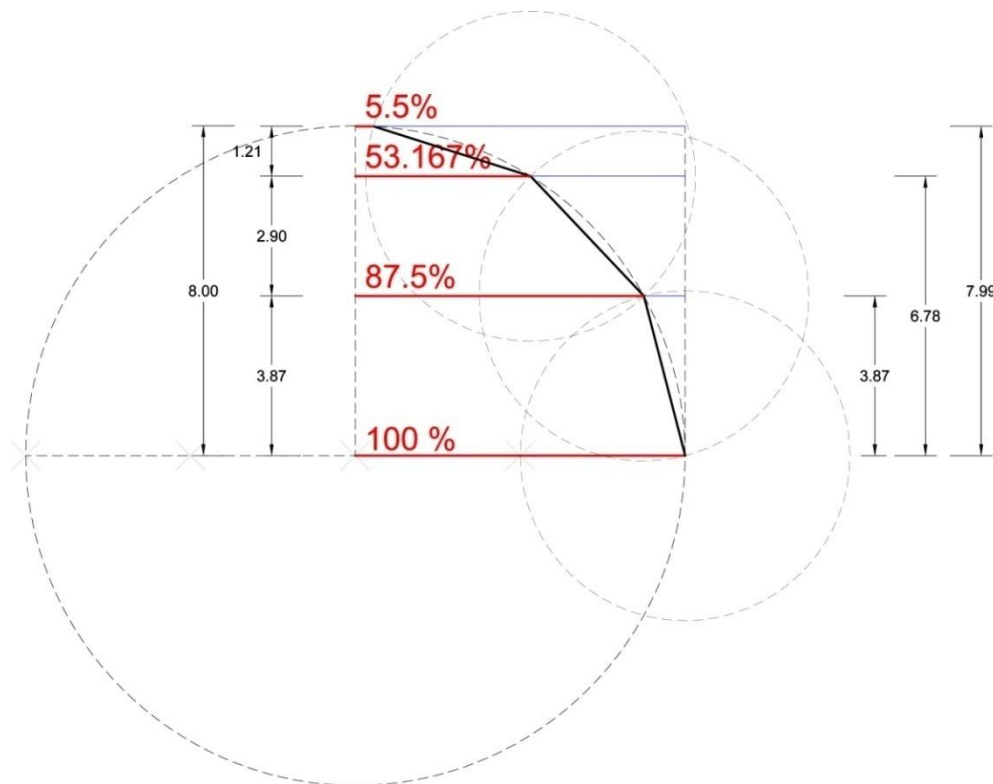


FIGURA 77. Método geométrico para calcular las alturas de los locales.

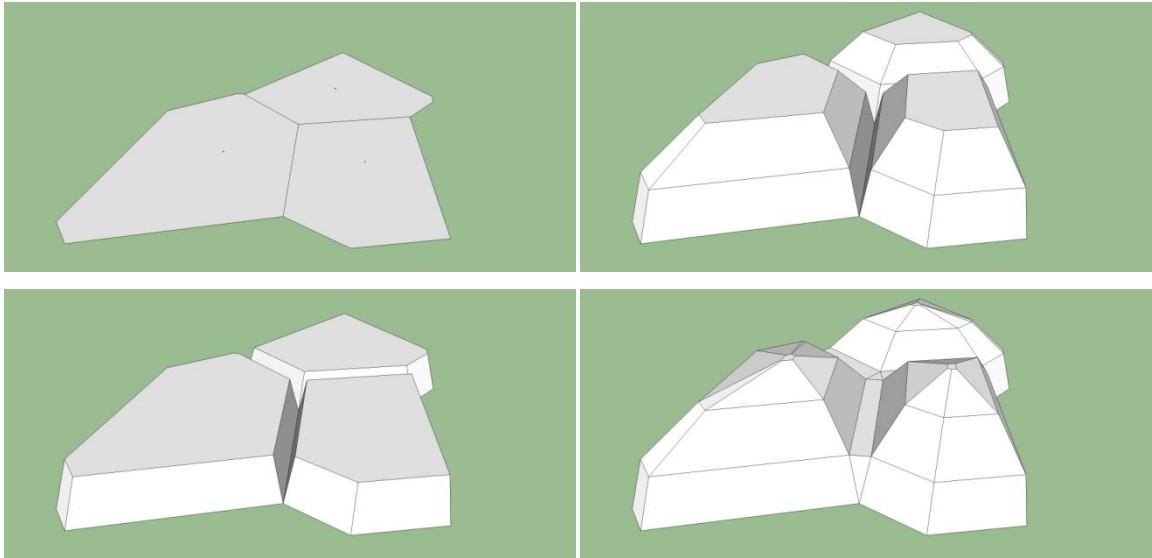


FIGURA 78. Construcción tridimensional de locales.

La forma resultante de los locales permite insertar elementos transparentes y opacos con el fin de dar intensidad de luz de acuerdo con los parámetros requeridos, tanto en el primer nivel como en la cubierta para el aprovechamiento de la luz natural, dejando el resto para acabados o estrategias que se integren con el entorno.

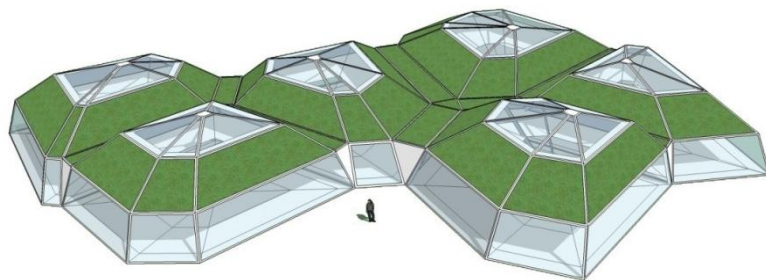


FIGURA 79. Conjunto de locales.

Al unir la cubierta y los grupos de locales concluye la etapa paramétrica del proyecto y finalmente se obtiene la base con la cual se diseñarán áreas comunes, accesos, interiores, áreas verdes, etc.

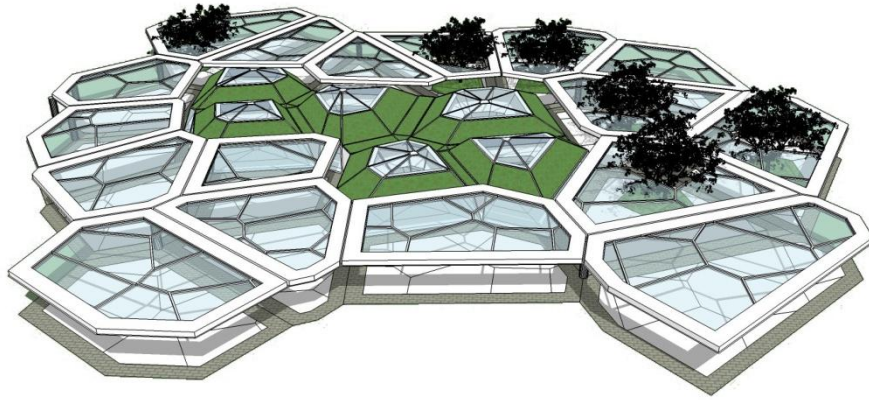


FIGURA 80. Conjunto de locales con cubierta y pasillo.

3.5 PRODUCTO



FIGURA 81. Plano Arquitectónico ARQ-1: Plantas Nivel 1 y Nivel 2



FIGURA 82. Plano Arquitectónico ARQ-2: Plantas de conjunto y azoteas

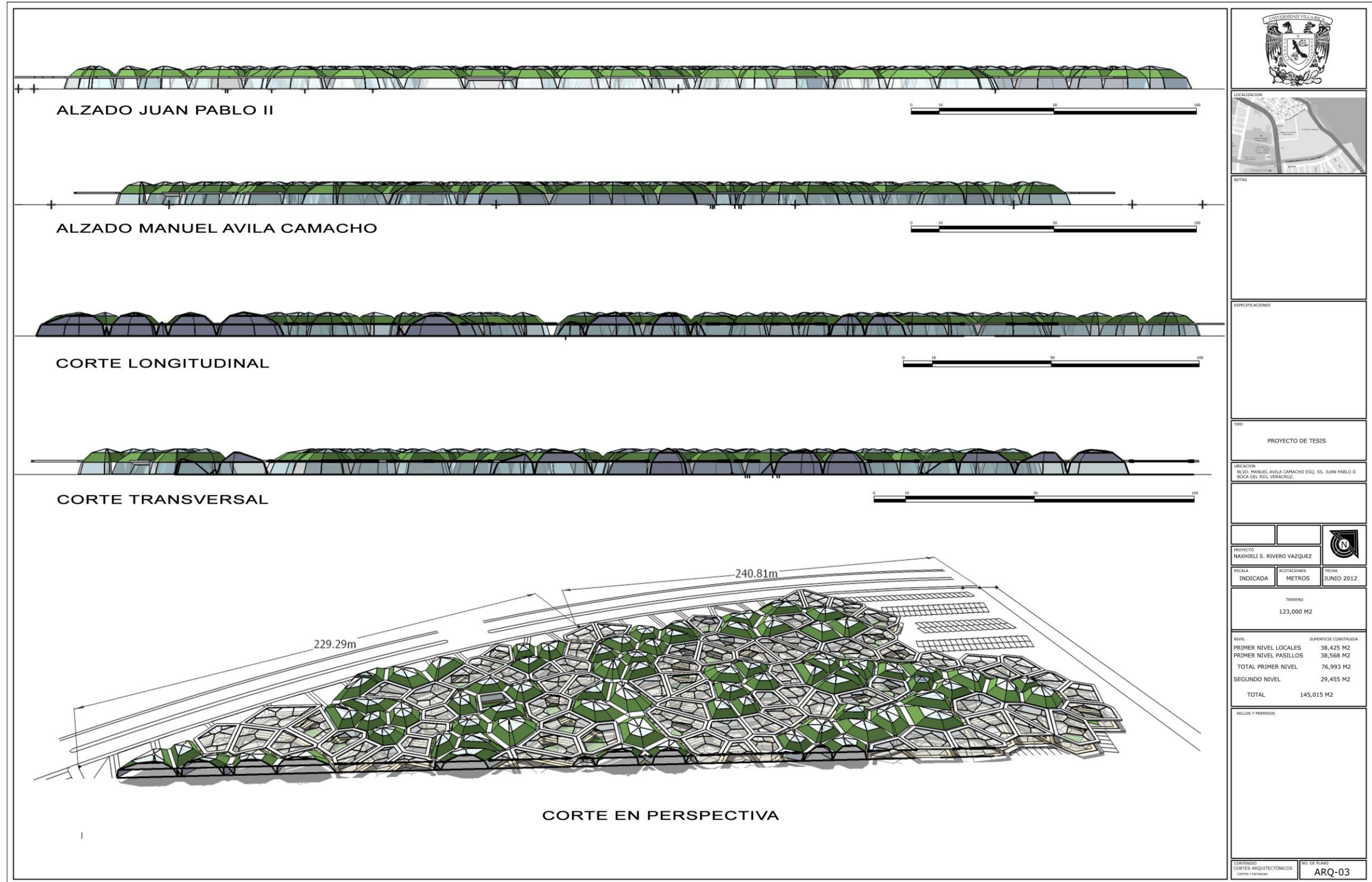
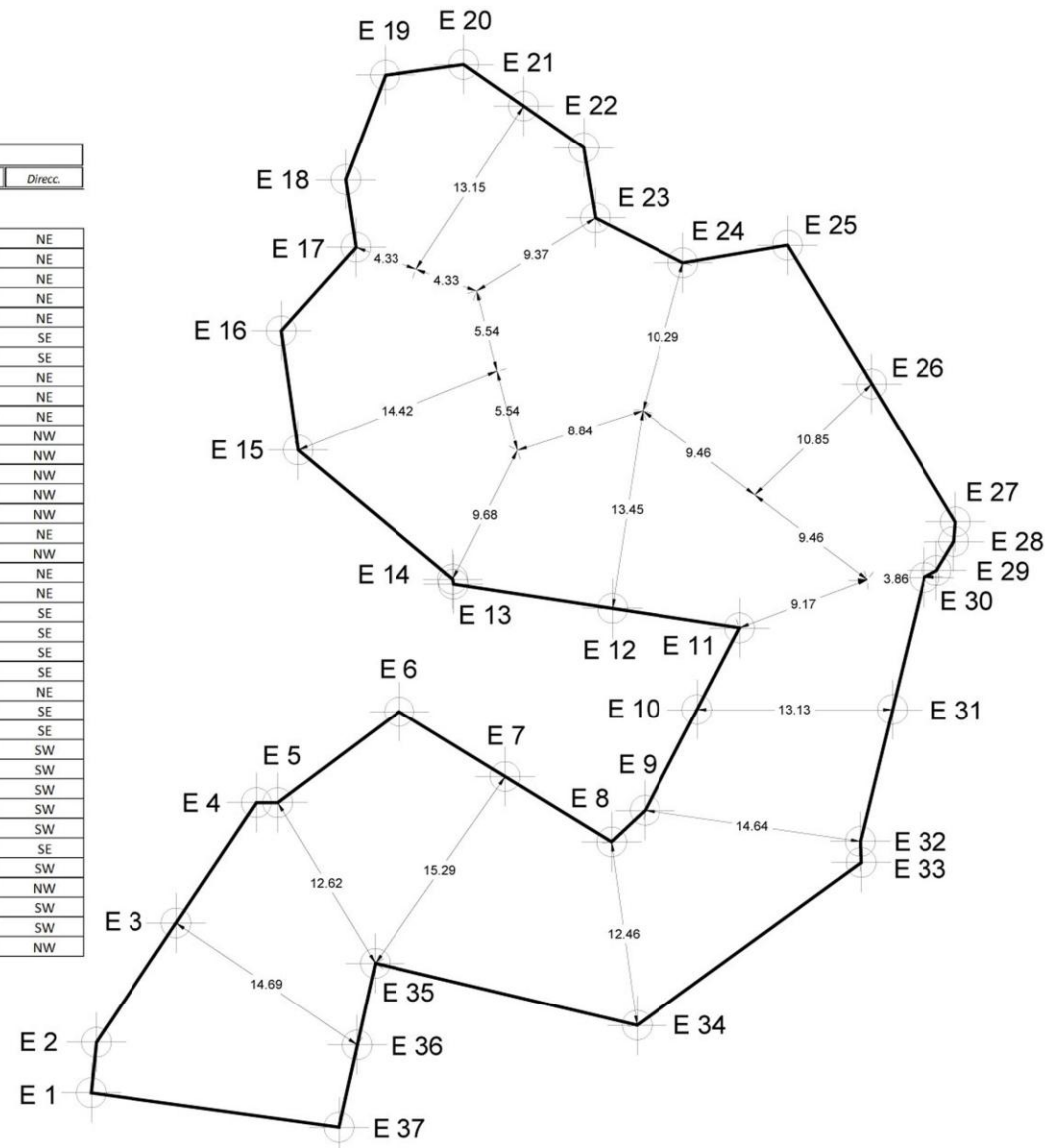



FIGURA 83. Plano Arquitectónico ARQ-3: Cortes y Alzados

E


Punto	Coordenadas		Est.	P.V.	Distancia	Rumbo			
	x	y				Grad.	Min.	Seg.	Direcc.
E1	1,040.7000	3,783.1300	E1	E2	3.418	84°	7'	21.39"	NE
E2	1,041.0500	3,786.5300	E2	E3	9.696	56°	13'	40.76"	NE
E3	1,046.4400	3,794.5900	E3	E4	9.696	56°	13'	40.76"	NE
E4	1,051.8300	3,802.6500	E4	E5	1.430	0°	0'	0.00"	NE
E5	1,053.2600	3,802.6500	E5	E6	10.230	36°	48'	50.00"	NE
E6	1,061.4500	3,808.7800	E6	E7	8.368	58°	26'	14.48"	SE
E7	1,068.5800	3,804.4000	E7	E8	8.376	58°	28'	23.37"	SE
E8	1,075.7200	3,800.0200	E8	E9	3.099	43°	10'	9.30"	NE
E9	1,077.9800	3,802.1400	E9	E10	7.653	62°	31'	51.18"	NE
E10	1,081.5100	3,808.9300	E10	E11	6.195	62°	36'	27.47"	NE
E11	1,084.3600	3,814.4300	E11	E12	8.668	81°	22'	28.02"	NW
E12	1,075.7900	3,815.7300	E12	E13	10.794	81°	18'	51.75"	NW
E13	1,065.1200	3,817.3600	E13	E14	0.335	10°	18'	17.45"	NW
E14	1,065.0600	3,817.6900	E14	E15	13.555	50°	14'	15.81"	NW
E15	1,054.6400	3,826.3600	E15	E16	8.120	8°	4'	12.84"	NW
E16	1,053.5000	3,834.4000	E16	E17	7.528	48°	10'	36.64"	NE
E17	1,058.5200	3,840.0100	E17	E18	4.592	8°	38'	30.54"	NW
E18	1,057.8300	3,844.5500	E18	E19	7.542	69°	11'	9.99"	NE
E19	1,060.5100	3,851.6000	E19	E20	5.330	7°	52'	18.02"	NE
E20	1,065.7900	3,852.3300	E20	E21	4.913	55°	6'	47.07"	SE
E21	1,069.8200	3,849.5200	E21	E22	4.921	55°	10'	46.80"	SE
E22	1,073.8600	3,846.7100	E22	E23	4.805	9°	27'	44.36"	SE
E23	1,074.6500	3,841.9700	E23	E24	6.623	62°	58'	14.56"	SE
E24	1,080.5500	3,838.9600	E24	E25	7.130	9°	36'	27.51"	NE
E25	1,087.5800	3,840.1500	E25	E26	10.895	31°	17'	50.80"	SE
E26	1,093.2400	3,830.8400	E26	E27	10.895	31°	17'	50.80"	SE
E27	1,098.9000	3,821.5300	E27	E28	1.314	4°	21'	54.93"	SW
E28	1,098.8000	3,820.2200	E28	E29	2.288	31°	2'	58.77"	SW
E29	1,097.6200	3,818.2600	E29	E30	0.935	61°	14'	34.36"	SW
E30	1,096.8000	3,817.8100	E30	E31	9.139	13°	40'	16.71"	SW
E31	1,094.6400	3,808.9300	E31	E32	9.139	13°	40'	16.71"	SW
E32	1,092.4800	3,800.0500	E32	E33	1.421	1°	36'	48.74"	SE
E33	1,092.5200	3,798.6300	E33	E34	18.636	54°	0'	56.06"	SW
E34	1,077.4400	3,787.6800	E34	E35	18.111	76°	37'	25.04"	NW
E35	1,059.8200	3,791.8700	E35	E36	5.653	12°	27'	46.26"	SW
E36	1,058.6000	3,786.3500	E36	E37	5.655	12°	33'	42.39"	SW
E37	1,057.3700	3,780.8300	E37	E1	16.828	82°	8'	39.70"	NW
	1,040.7000	3,783.1300	E37	E1					



EJEMPLO DE TRAZO DE POLIGONAL DE CLUSTERS



LOCALIZACIÓN



NOTAS

ESPECIFICACIONES

TIPO
PROYECTO DE TESIS

UBICACIÓN
BLVD. MANUEL VIELA CAMACHO ESQ. SR. JUAN PABLO II BOCA DEL RÍO, VERACRUZ.

ESCALA GRAFICA

PROYECTO
MARKIEL S. RIVERO VAZQUEZ

ESCALA INDICADA: METROS
ACTUACIONES: METROS
FECHA: JUNIO 2012

TERRENO
123,000 M2

NIVEL	SUPERFICIE CONSTRUIDA
PRIMER NIVEL LOCALES	38,425 M2
PRIMER NIVEL PASILLOS	38,568 M2
TOTAL PRIMER NIVEL	76,993 M2
SEGUNDO NIVEL	29,455 M2
TOTAL	145,015 M2

SELLOS Y PERMISOS

CONTENIDO
TRAZO DE POLIGONALES
COPIA Y

NO. DE PLANO
ARQ-04

FIGURA 84. Plano Arquitectónico ARQ-4: Trazo de poligonal del cluster E

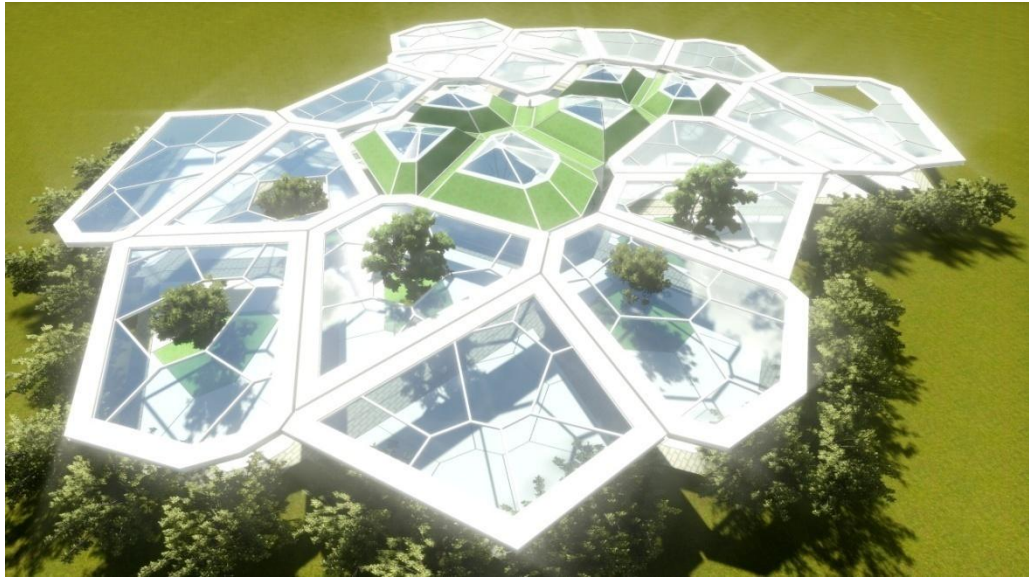


FIGURA 85. Perspectiva.

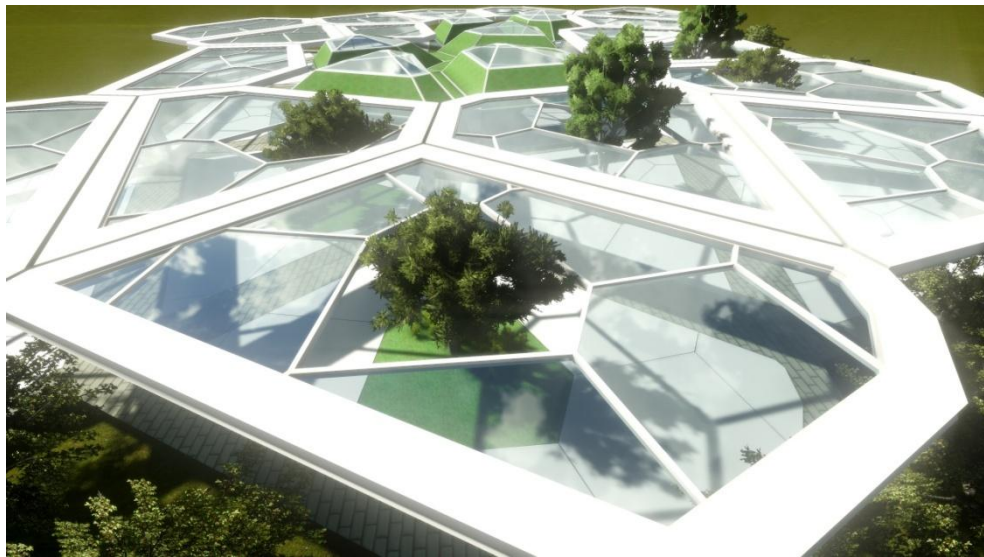


FIGURA 86. Perspectiva.

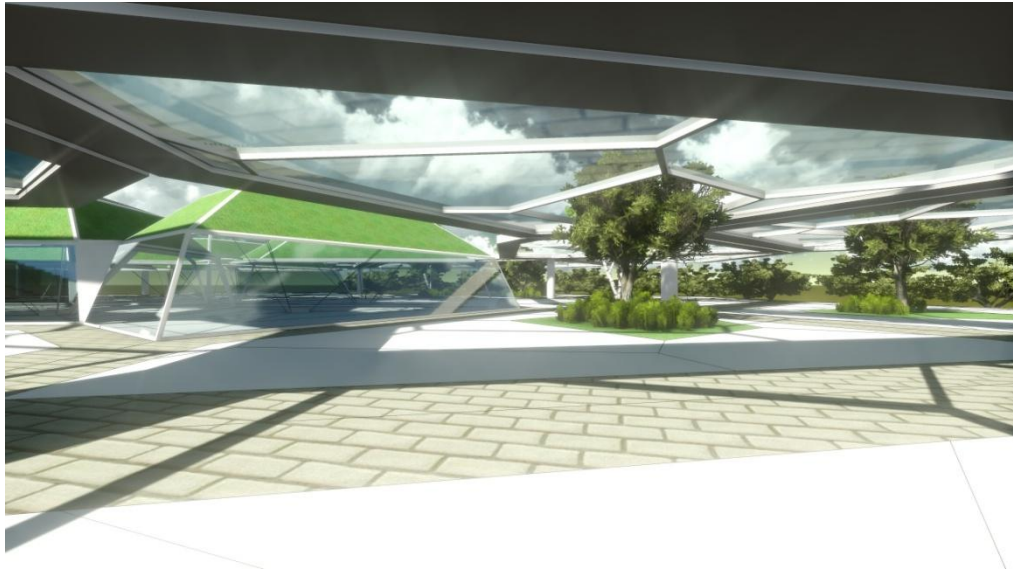


FIGURA 87. Perspectiva

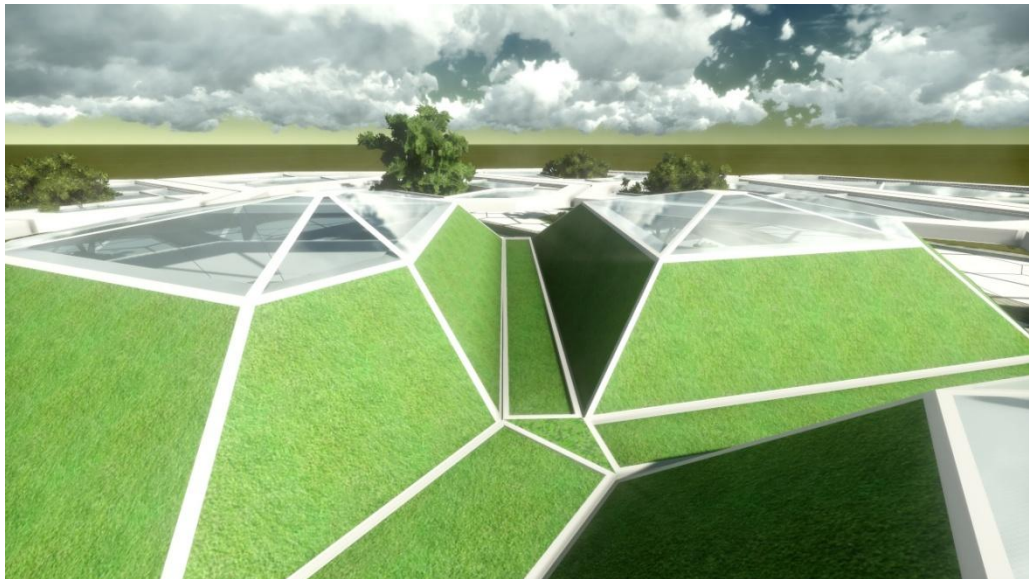


FIGURA 88. Perspectiva



FIGURA 89. Maqueta final vista en planta.



FIGURA 90. Vista de maqueta en el contexto.

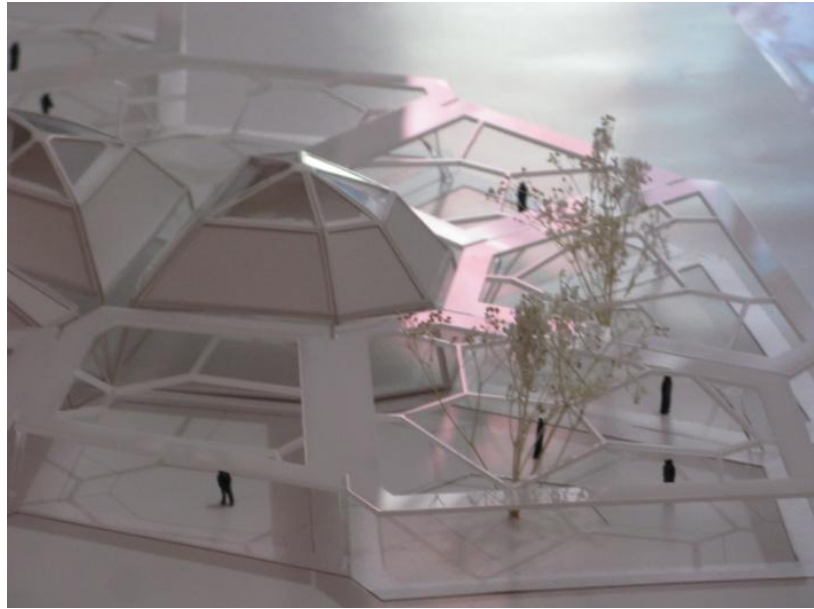


FIGURA 91. Vista en el contexto.



FIGURA 92. Vista en el contexto.

CONCLUSIÓN

La arquitectura experimentada con herramientas digitales es una evolución que se está dando y seguirá en constante cambio durante mucho tiempo, ya que no es sólo una moda o corriente, es una manera de solución a las problemáticas actuales de espacios y entornos cada vez más complicados y exigentes. Ahora la arquitectura no sólo tiene un estilo o un adorno, tiene una respuesta y una solución a la hora de generar los espacios habitables integrándolos a su entorno en forma óptima .

Con sus múltiples aplicaciones, la arquitectura virtual, además de utilizarse para la visualización del proyecto arquitectónico, nos ofrece otra forma de generar espacios, no sólo imitando a la naturaleza, también simulándola y se experimenta aplicando su estructura para generar formas de geometría irregular, estableciendo nuevos espacios y logrando que los edificios sean posibles de realizar.

Con los avances que se están dando actualmente, los edificios que se creían utópicos de construir por la carencia de ángulos rectos, actualmente se están logrando hacer gracias al avance tecnológico en la ingeniería de materiales y las herramientas digitales, realizar este tipo de edificaciones resulta ser de alto costo por la innovación tecnológica en su ejecución.

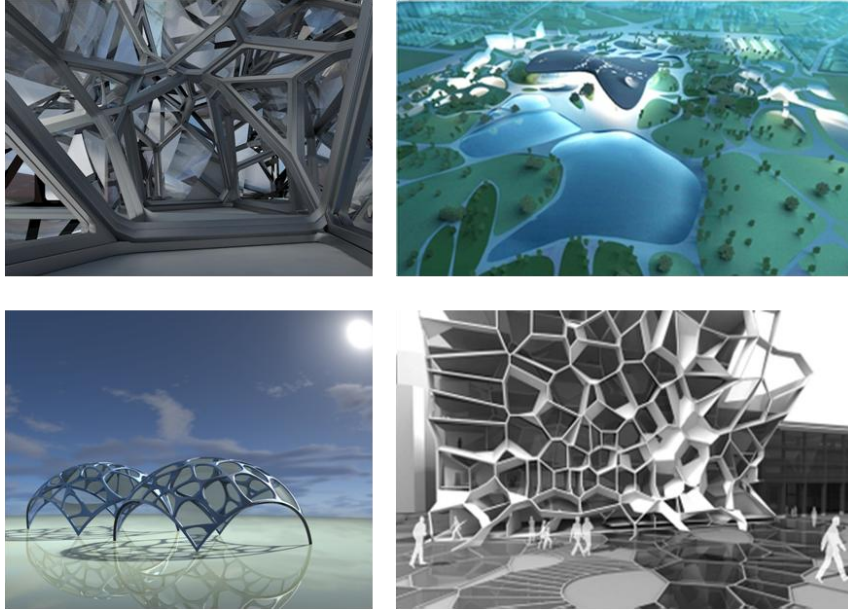


FIGURA 93. Diversos resultados de escenarios experimentando con método Voronoi

Se concluye que la tecnología actual y sus constantes avances, permiten establecer nuevos métodos para la generación de espacios. La continua experimentación de los arquitectos ya no limita su creatividad, por el contrario, la expande.

Es tiempo de proponer nuevas soluciones, como es el objetivo de esta tesis, en donde se resuelve una problemática social actual, experimentando con nuevas tecnologías y métodos, como el de Voronoi, proponiendo una solución que da como resultado una forma generada con pocos parámetros, creando así espacios funcionales.

En el tema de la presente tesis es más importante la generación de espacios a partir de la irregularidad del terreno, y con este método se puede solucionar temas

relacionados con la radiación solar, la orientación del edificio, así como la existencia de problemáticas por los obstáculos en el terreno como dunas, cuerpos de agua, arboles, y otros que no se puedan o deban remover.

Ahora todo depende del criterio del arquitecto y de su creatividad para resolver problemas. Es importante que los nuevos arquitectos no se cierren a estos métodos y, se divulguen, ya que se desconoce mucho de este tipo de temas.

Se convierte en todo un reto para las nuevas generaciones de profesionistas en ingeniería y arquitectura.



FIGURA 94. Render final del proyecto

En el proceso de este trabajo de investigación, se experimentó con el uso de herramientas digitales y, el usar un método de organización natural, dio como

resultado una estructura orgánica, permitiendo el paso de la luz solar, dirigiendo a los visitantes a lugares específicos y utilizando lineamientos que establecen parámetros utilizados en el diseño de espacios. Se obtuvieron formas complejas y atractivas, que van de la mano con la funcionalidad del edificio.

BIBLIOGRAFÍA

Abellanas, Manuel. *Envolvente convexa, triangulación de Delaunay y diagrama de Voronoi: tres estructuras geométricas en una, con muchas aplicaciones*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid Facultad de Informática Departamento de Matemática aplicada.

Ferre, Albert. *Natures*. Barcelona: Actar, 2006.

Gauzin-Müller. *Arquitectura ecológica*. Barcelona: GG, 2002.

Hirose, Michitaka. *Human-computer interaction INTERACT '01*. Amsterdam: IOS Press, 2001.

<http://ed-thelen.org/comp-hist/BRL61-ibm1401.html>.

Knippers, Jan. *Computational design modelling proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011*. Berlin : Springer, 2011.

Rivero, Francisco. *Geometría Computacional*. Mérida Venezuela: Universidad de los Andes Facultad de Ciencias Departamento de Matemáticas.

Steele, James. *Arquitectura y revolución digital*. México: Gustavo Gili, 2001.

Sutherland, Ivan Edward. *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*. Technical Report No. 296, Cambridge: University of Cambridge, 2003.