

Título

NUEVO ORDEN Y REGULACIÓN EN LA CONFIGURACIÓN
ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA

Subtítulo

Red de variables constitutivas del proyecto

Director: Arq. Fernando Gandolfi.

Co – Director: Dr. Javier Fernández Castro

Doctoranda: Arq. Susana Toscano

-Buenos Aires, 2022-

ÍNDICE

RESUMEN:	7
ABSTRACT	9
AGRADECIMIENTOS	12
INTRODUCCIÓN	14
FUNDAMENTACIÓN	16
ESTADO DE LA CUESTIÓN	20
OBJETIVOS	32
PARTE I:	
POSICIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA EN LA ARQUITECTURA HASTA LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX.....	33
I.1 LA ANTIGÜEDAD CLÁSICA.....	34
ANTECEDENTES	34
GRECIA: INTERPRETACIÓN DEL PERFECTO ORDEN DEL UNIVERSO MEDIANTE LA GEOMETRÍA	35
ROMA: GEOMETRÍA Y TECNOLOGÍA EN FUNCIÓN DEL PODER	39
CONTEXTUALIZACIÓN.....	39
El Panteón de Agripa.....	40
Las Termas.....	42
I.2 ENTRE LA CAÍDA DEL IMPERIO Y EL FIN DE LA EDAD MEDIA: LA ÉPOCA DE LA FE	45
EL COMIENZO: ARQUITECTURA PALEOCRISTIANA Y BIZANTINA.....	45
PERÍODO ROMÁNICO: VERTICALIDAD Y HORIZANTOLIDAD PARA ACERCARSE A DIOS	48
ARQUITECTURA GÓTICA: ÚLTIMA ETAPA DEL TEOCENTRISMO	51
I.3. SIGLO XV: GEOMETRIZACIÓN DEL ORDEN CÓSMICO Y ESPACIAL	62
CONTEXTUALIZACIÓN.....	62
ESPACIO – PROPORCIONES – PERSPECTIVA.....	64
BRUNELLESCHI (1377 – 1446): GEOMETRÍA – PROPORCIONES – ESTRUCTURA..	65
Sacristía Vieja de la Catedral de San Lorenzo (1420 – 1429).....	65
Basílica de San Lorenzo (1422 – 1446).....	66
Cúpula de Santa María di Fiore (1420 – 1436).....	68
Iglesia del Espíritu Santo (1444 – 1446).....	69

LEÓN BATTISTA ALBERTI (1404 – 1472): TRATADOS: PROPORCIONES Y ESTRUCTURA.....	71
BRAMANTE (1445 – 1515): COMPOSICIÓN DE LA FORMA IDEAL, EL ESPACIO....	73
Santa María Presso San Sático.....	73
San Pietro in Montorio (1502): El problema de la composición....	75
I.4.	
SIGLO XVI: LA DISOLUCIÓN DEL ORDEN PERFECTO.....	77
CONTEXTUALIZACIÓN.....	77
EL ESPACIO Y LA GEOMETRÍA DE LAS NUEVAS MANERAS DE LA ARQUITECTURA.....	78
MIGUEL ÁNGEL (1475 – 1564): TRANSGRESIÓN DEL ORDEN GEOMÉTRICO ESTABLECIDO.....	80
ANDREA PALADIO (1508 – 1580): BÚSQUEDA DEL EQUILIBRIO A TRAVÉS DE LAS PROPORCIONES MATEMÁTICAS.....	83
I.5. SIGLO XVII: “EL PARADIGMA CARTESIANO NEWTONIANO” HACIA UNA NUEVA FORMA DE DISEÑO	86
CONTEXTUALIZACIÓN.....	86
GALILEO - DESCARTES: INICIO DEL PARADIGMA CARTESIANO – NEWTONIANO.....	87
BERNINI Y BORROMINI: GEOMETRÍA EUCLIDIANA PARA DOS CONCEPCIONES ESPACIALES DISTINTAS.....	89
EFICACIA Y OPTIMIZACIÓN.....	92
ÚLTIMAS DÉCADAS DEL S. XVII.....	93
I.6. SIGLO XVIII: GEOMETRÍA E ILUSTRACIÓN.....	94
CONTEXTUALIZACIÓN	94
LA CAÍDA DEFINITIVA DE LAS PROPORCIONES COMO SÍMBOLO DE BELLEZA Y ARMONÍA.....	95
RACIONALIDAD FUNCIONAL Y MATERIAL. CÁLCULO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS MATEMÁTICO	96
I.7. SIGLO XIX: REVOLUCIÓN INDUSTRIAL EL AVANCE EN LA INFLUENCIA DE LA BIOLOGÍA SOBRE LA LÓGICA NEWTONIANA.....	99
CONTEXTUALIZACIÓN.....	99
LA FÍSICA MATEMÁTICA Y EL AVANCE ESTRUCTURAL.....	100
EL AVANCE EN LA INFLUENCIA DE LA BIOLOGÍA SOBRE LA ARQUITECTURA	102
EL ESPACIO DE LA ARQUITECTURA DE HIERRO Y VIDRIO.....	106

ANTONI GAUDÍ (1852-1926): ESPACIO Y RESOLUCIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE LA MATERIALIZACIÓN DE CÓNICAS Y CUÁDRICAS.....	107
I.8. PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX, ORGANINICISMO Y RACIONALIDAD.....	109
CONTEXTUALIZACIÓN.....	109
Incidencia de la geometría en el organicismo y la morfología.....	110
FRANK LLOYD WRIGHT (1867 – 1959): ORGANICISMO ESPACIAL.....	111
ARQUITECTURA MODERNA.....	116
Bauhaus, geometría, técnica y racionalidad	117
GEOMETRÍA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX.....	119
MIES VAN DER ROHE (1886 -1965): ABSTRACCIÓN, GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y ESPACIO.....	120
LE CORBUSIER (1887 –1965): MECANISMOS GEOMÉTRICOS DE CONTROL: GEOMETRÍA Y PROPORCIONES EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL Y LA ESTRUCTURA.....	122
La sección áurea.....	124
Las mallas ortogonales.....	127
Eje, simetría y ritmo	128
Espacio.....	129
I.9. MEDIADOS DEL SIGLO XX: HACIA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE LA GEOMETRÍA Y LA BIOLOGÍA.....	131
CONTEXTUALIZACIÓN.....	131
RICHARD BUCKMINSTER FULLER (1917 – 1983).....	133
DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS DE BARRA.....	134
ESTRUCTURAS LAMINARES.....	136
TERMINAL DE PASAJEROS DE LA AEROLÍNEA TRANS WORLD AIRLINES (TWA).....	138
ÓPERA DE SIDNEY.....	139
PARTE II:	
CRISIS DE LOS MODELOS ESTABLECIDOS.....	143
CONTEXTUALIZACIÓN.....	144
II.1. DECONSTRUCTIVISMO.....	145
II.2. EXPOSICIÓN “ARQUITECTURA DECONSTRUCTIVISTA”: PROYECTOS.....	147
FRANK GEHRY: CASA GEHRY, SANTA MÓNICA CALIFORNIA 1978 – 1988.	147
DANIEL LIBESKING, BORDE URBANO. BERLIN, REPÚBLICA FEDERAL ALEMANA. 1987.....	147

REM KOOLHAS (OMA), EDIFICIO DE APARTAMENTOS Y TORRE DE OBSERVACIÓN. ROTTERDAM. HOLANDA, 1982.....	149
PETER EISENMAN, BIOCENRO PARA LA UNIVERSIDAD DE FRANKFURT, REÚBLICA FEDERAL ALEMANA. 1987	150
ZAHA HADID, <i>THE PEAK</i>. HONG KONG. 1982.....	150
COOP HIMMELBLAU, REMODELACIÓN DE UN ÁTICO. VIENA, AUSTRIA. 1985.....	151
BERNARD TSHUMI, <i>PARC DE LA VILLETTE</i>. PARÍS, FRANCIA. 1982 – 1985.	152
II.3. SIGLO XX: ATAQUES FILOSÓFICOS Y CIENTÍFICOS AL ORDEN ESTABLECIDO.....	153
CORRELATO ARQUITECTÓNICO DEL DISCURSO DE FRIEDRICH NIETZSCHE, (1844 – 1900). FIN DE LOS ABSOLUTOS Y LAS METODOLOGÍAS ESTABLECIDAS	153
JACQUES DERRIDA (1933 – 2004). EXPRESIÓN A TRAVÉS DE LA NEGACIÓN DE LOS CÁNONES EUCLIDIANOS.....	155
II.4. AVANCES CIENTÍFICOS Y LA UTILIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL Y LA ESTRUCTURA.....	158
FÍSICA CUÁNTICA, INCERTIDUMBRE DE LA UBICACIÓN EN EL ESPACIO.	158
EL PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN DE HEISEMBERG (1927).....	160
EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD DE NIELS BOHR (1927 – 1930)..	161
LOS TEOREMAS DE INCOMPLETITUD DE KURT GÖDEL (1931).....	163
PARTE III:	
INCERTIDUMBRE.....	168
III.1. COMPLEJIDAD.....	169
PENSAMIENTO COMPLEJO.....	171
Pensamiento Complejo: sustentabilidad y arquitectura	172
Desarrollo sustentable.....	173
III.2. ANTECEDENTES DEL PENSAMIENTO COMPLEJO Y SU INCIDENCIA EN LA ARQUITECTURA.	175
TEORÍA DE LOS SISTEMAS.....	175
Teoría de los Sistemas y Arquitectura tradicional.....	176
Concepciones de la Teoría de los Sistemas en la Arq.	177
Terminal Internacional de pasajeros de Yokohama.....	178
CIBERNÉTICA.....	182
Relaciones entre cibernética y arquitectura.....	183

Autoorganización, cibernética y arquitectura	185
TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN Y ARQUITECTURA DIGITAL.....	187
III.3. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD.....	189
CAMINO HACIA LA CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD.....	190
LAS CINCO CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SEGÚN CARLOS MALDONADO.....	191
La termodinámica del no equilibrio.....	191
La teoría del caos.....	192
Geometría fractal.....	194
Dimensión fractal de Hausdorff.....	194
Teoría de las catástrofes.	196
La ciencia de las redes.....	197
III.4. CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA.....	201
III.5. GEOMETRÍAS EMPLEADAS EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA.....	206
GEOMETRÍA DIFERENCIAL.....	208
Ramas de la geometría diferencial.....	209
Geometría diferencial de curvas.....	209
Geometría diferencial de superficies.....	209
Geometría diferencial de variedades.....	210
TOPOLOGÍA.....	210
APORTES DE LA GEOMETRÍA DIFERENCIAL A LA TOPOLOGÍA.....	213
Generalización del concepto de dimensión.....	213
Variedades diferenciables matemáticas.....	215
GEOMETRÍA ALGEBRÁICA.....	217
III.6. APORTES DE LA GEOMETRÍA DIFERENCIAL Y ALGEBRAICA EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA.....	220
CONCEPTOS MATEMÁTICOS PRELIMINARES.....	220
Función diferenciable.....	220
Concepto matemático de parametrización.....	222
Curva diferenciable.....	223

INTERPRETACIÓN GEOMÉTRICA DE CURVAS Y SUPERFICIES UTILIZADAS EN EL DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD).....	225
Trazadores interpolantes cúbicos.....	229
Curvas spline y b – spline.....	229
Curvas bezier.....	231
Curvas y superficies nurbs “línea de base racional uniforme”... 	233
Mallas.....	235
III.7. DISEÑO GENERATIVO Y MORFOGÉNESIS.....	240
DISCRETIZACIÓN: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM).....	251
III.8. ESTRATEGIAS PARA LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA.....	256
DIAGRAMÁTICA.....	257
Tipologías de diagramas.....	259
Diagramas de la arquitectura compleja.....	260
SANAA: arquitectura diagramática.....	261
Centro de Estudios Rolex.....	262
UN STUDIO: diagramas en respuesta a variables relevantes del proyecto.....	264
Concurso Manhattan, modelo de ciudad global (1999)....	265
Museo Mercedes Benz. Stuttgart, Alemania. (“2006).....	266
Forengin office architects (foa): relaciones entre herramientas virtuales y componentes de materialización	270
OMA: Rem Koolhaas. toma de decisiones y planificación.....	271
Biblioteca de Seattle (1999- 2004).....	272
MVRDV: Winy Maas, Jacob Van Rijs y Nathalie de Vries. datascares (paisaje dde datos).....	276
Bloque Residencial Silodam de Amsterdam.....	277
DISEÑO PARAMÉTRICO.....	280
ALGORITMOS.....	284
Algoritmos generativos. determinación de sistemas formales partiendo de objetos y reglas geométricos.....	286
Algoritmos genéticos.....	291
CONCLUSIÓN.....	297
BIBLIOGRAFÍA.....	304

RESUMEN:

La presente tesis se propone indagar, dentro del nuevo paradigma de diseño, la existencia de elementos abarcativos de la obra de arquitectura compleja, ordenadores y reguladores del diseño, válidos para todos y cada uno de los hechos arquitectónicos por ella generados.

El desarrollo teórico se funda en dos definiciones y dos premisas:

Premisa 1: Se asume que, tras un largo proceso socio – científico – cultural, se ha producido un cambio de paradigma, visualizado masivamente en las últimas décadas, lo que incluye un cambio de paradigma del diseño el cual se desarrolla bajo una mirada holística del proyecto, con consideración de las interrelaciones de las variables constitutivas, entre las cuales se encuentran las conceptualizaciones y aplicaciones geométricas y analíticas de empleo en la disciplina.

Premisa 2: En el paradigma que científicamente se dio en llamar de la simplificación y en el que todos hemos sido formados, se han identificado a las matemáticas como ordenadoras del diseño e indispensable para su concreción, sin mediar demostración alguna.

Definición 1: Arquitectura Compleja es aquella que, desechando el determinismo causístico y el reduccionismo del paradigma de la simplicidad, basa sus desarrollos en un pensamiento sistémico integrador y abarcativo, que toma en cuenta las interrelaciones entre variables constitutivas, incluyendo al sujeto, el tiempo, el movimiento, los emergentes, la aleatoriedad y la impredecibilidad.

Definición 2: Una variable, tanto cualitativa como cuantitativa, constituye un constructo que permite identificar a un elemento no especificado dentro de un determinado grupo, al adquirir distintos valores. Se entiende por constructo a todo concepto inventado o adoptado de manera deliberada y consciente con un propósito científico determinado.

El nudo del presente desarrollo se centra en la incidencia sobre la configuración espacial de las interrelaciones entre variables constitutivas de la gestación y concreción de las obras de la Arquitectura Compleja; más específicamente, el papel que cumple la variable matemática dentro de la totalidad sistémica de esa configuración espacial, en el periodo temporal abarcado entre la exposición del MoMA de 1988, “Arquitectura

Deconstructivista” y la 14ª Bienal inaugurada el 7 de junio de 2014 dirigida por Rem Koolhaas bajo el lema “*Fundamentals*”.

ABSTRACT:

The present thesis proposes to investigate, within the new design paradigm, the existence of encompassing elements of the work of complex architecture, which are the computers and regulating elements of the design, valid for each and every one of the architectural facts generated by it.

The theoretical development is based on two definitions and two premises:

Premise 1: It is assumed that, after a long socio - scientific - cultural process, there has been a paradigm shift, massively visualized in the last decades, which includes a paradigm shift of the design which is developed under a holistic view of the project, with consideration of the interrelations of the constituent variables, among which are the conceptualizations and geometric and analytical applications of employment in the discipline.

Premise 2: In the paradigm scientifically known as simplification, in which we have all been trained, mathematics has been identified as the ordering of design and indispensable for its realization, without any demonstration whatsoever.

Definition 1: Complex architecture is that which, discarding the causal determinism and reductionism of the paradigm of simplicity, bases its developments on an integrative and encompassing systemic thinking, which takes into account the interrelationships between constituent variables, including the subject, time, movement, emergence, randomness and unpredictability.

Definition 2: A variable, whether qualitative or quantitative, is a construct that makes it possible to identify an unspecified element within a given group by acquiring different values. A construct is understood as any concept invented or adopted deliberately and consciously for a specific scientific purpose.

The crux of the present development focuses on the incidence on the spatial configuration of the interrelationships between variables constitutive of the gestation and concretion of the works of Complex Architecture; more specifically, the role played by the mathematical variable within the systemic totality of that spatial configuration, in the time period spanned between the 1988 MoMA exhibition, "Deconstructivist Architecture" and

the 14th Biennial inaugurated on June 7, 2014 directed by Rem Koolhaas under the motto "Fundamentals".

*A MIS HIJOS GUADALUPE Y NAHUEL
A MIS NIETOS MAIA Y THIAGO*

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi reconocimiento a todas las personas que me acompañaron en el recorrido de investigación que permitió la elaboración de esta tesis. Cada una de ellas, al conocerme, saben cuánto les estoy agradecida.

La palabra “gracias” a veces es demasiado simple y, en muchas ocasiones, se usa como mera formalidad vacía de contenido. En mi caso, creo que es demasiado pequeña para expresar el reconocimiento a la generosidad de ciertas personas, que por distintas causas y azares me he ido cruzado en el camino; hermosos regalos de la vida.

Simplemente nombraré a algunos de ellos:

Cada uno de los integrantes de la Comisión de Doctorado y Postgrado de la Facultad de Arquitectura de la UNLP que, desarrollando un excelente trabajo académico, antepusieron la esencia humana a la currícula formal de este Doctorado.

Prof. Arq. Fernando Gandolfi y Dr. Arq. Javier Fernández Castro, director y co-director de esta tesis, que desde un principio confiaron en mí y consintieron en asumir la tarea cuando esta investigación apenas era un proyecto.

Al Arq. Gandolfi le agradezco cada uno de los aportes realizados, surgidos de una minuciosa y concienzuda lectura, enriqueciendo enormemente el trabajo.

Al Dr. Fernández Castro, la oportunidad que me brindó de pertenecer al Instituto de Espacialidad Humana de la UBA y la valorización que siempre demostró hacia los desarrollos académicos por mí realizados.

Fue, a través de Carlos Federico y Néstor Días que pude conocer a mi director y, además les agradezco haberme incorporado, a través de un concurso a esta Facultad de Arquitectura en la UNLP.

También deseo agradecer a todo el cuerpo docente que compone las diferentes cátedras bajo mi titularidad (vinculadas a la Matemática) que tanto contribuyeron a la construcción de nuevos conocimientos mediante su participación en los trabajos de investigación que hemos llevado adelante, además de haber asumido muchas veces, tareas dentro de las asignaturas, permitiendo que dedicara más horas de trabajo a la tesis.

Entre ellos, deseo nombrar a Marcelo Pérez Orona, Manuel Shibuya, María Elvira Garbesi, Luis Bianchetti, Maximiliano Monteros y si bien no revisto el cargo de titular en la UNLP, deseo agradecer a Marcelo Filleni, que sí lo es y a su adjunto Pedro Orazi.

Imposible dejar de mencionar el gran apoyo, a nivel afectivo e intelectual, que significó la generosidad sin límites de Rina Buffa; además de acompañarme y alentarme incansablemente a lo largo de este desarrollo, puso a mi disposición toda su gran capacidad para que pudiese entregar la tesis.

Mi amiga Adriana Didero que se constituyó en compañía indispensable en este viaje.

Por último, deseo agradecer muy especialmente a mis hijos Guadalupe y Nahuel Ricagno y a mi prima - madre Norma Lapuente por el amor y la confianza que siempre depositaron en mí. Ellos constituyeron el motor que me impidió bajar los brazos. No los podía defraudar.

INTRODUCCIÓN

Se podría decir que el espacio arquitectónico es una conceptualización que conlleva discusiones filosóficas, históricas, artísticas y disciplinares; dentro de esas discusiones se debería incluir la conceptualización del espacio de la arquitectura compleja.

Esta tesis no plantea adentrarse en la problemática y disquisiciones del espacio en sí y sus implicancias, aunque por momentos se deberá hacer uso de desarrollos teóricos que en algún punto hacen referencia a ello. Lo que se plantea es la configuración espacial, el cómo y el porqué de la gestación y concreción del espacio generado en el marco del paradigma de la complejidad, que hace uso frecuentemente de una estética caótica, disociada de las estéticas tradicionales, aparentemente caprichosas y alejadas de los modelos establecidos.

Ante tal contraste entre lo que en adelante llamaremos “arquitectura establecida”, abarcando un período que va desde los griegos a mediados del siglo XX y la arquitectura compleja, se intentó hallar elementos comunes entre ambas arquitecturas.

A nuestro entender, bajo la interdisciplinariedad de la matemática y la arquitecta, los elementos comunes encontrados fueron: el hombre con su “aquí y ahora” dentro de una cosmovisión determinada y el uso de la matemática para modelar el macrocosmos y llevarlo a su microcosmos formulando la propia configuración espacial.

Queda por responder, cómo es que un único modelo matemático, el tradicional, haya respondido en cada momento histórico a una cosmovisión determinada y de qué forma se comporta esa matemática en el actual paradigma respondiendo a él; en todo caso, debería plantearse un nuevo paradigma de aplicaciones matemáticas en correspondencia con el nuevo paradigma de diseño.

Teniendo presente estos interrogantes y la certeza de que el abordaje de toda temática desde la complejidad se realiza bajo el análisis de las redes de interacciones entre variables constitutivas del objeto estudiado, se elaboró la siguiente hipótesis:

En el nuevo paradigma de diseño, la matemática conforma una estructura subyacente al proyecto, abarcando el todo, ordenando y regulándolo, tomando en cuenta las interrelaciones de variables que lo constituyen.

Dado que dentro del marco de una tesis es imposible abarcar todas las interrelaciones de todos los subsistemas intervinientes en el proyecto, se seleccionaron las interrelaciones de las variables que componen el subsistema configuración espacial y el subsistema conformado por la estructura resistente, a efectos de analizar la presencia o no, de una red geométrico - matemática subyacente a ambos subsistemas y estructurantes de estos.

La elección de las variables seleccionadas se basa en las siguientes razones:

Se considera la configuración espacial, por su capacidad de expresión de un paradigma determinado, utilizando para su generación, la geometría y la matemática, según la cosmovisión y el modelo científico, del momento histórico vigente.

La elección de la estructura resistente responde a la incidencia de las lógicas newtonianas y no-newtonianas en la determinación estructural, el papel que ésta juega en la configuración espacial y la incidencia de la Geometría y el Análisis Matemático en su materialización.

Por lo tanto, el presente desarrollo referirá a la existencia de una estructura matemática, conformada por una red de interrelaciones subyacente en el subsistema.

Estructura resistente – configuración espacial del hecho arquitectónico.

FUNDAMENTACIÓN

Referirse a la configuración espacial de la arquitectura compleja, implica enfrentarse a dicha problemática desde la complejidad, lo que supone desestimar los absolutos, hablar en términos organizacionales y no programáticos, inclusión de multiplicidad de variables constitutivas, tener presente la aleatoriedad, la incertidumbre y los emergentes. Dicho en otros términos, la complejidad implica incompletud y falta de certezas.

En línea con esta postura, el desarrollo de la tesis debió abordar multiplicidad de variables lo que dificultó acotar el campo temático y temporal de desarrollo de la misma y, por más que ello se hizo, hubo que recurrir a otros tiempos y saberes, desestimando la linealidad conceptual y temporal.

El abordaje de esta investigación supuso afrontar varios desafíos que devinieron en el desarrollo de la presente tesis:

- a. En primer lugar, se admitió que indicar un nuevo paradigma de diseño, requiere justificar que éste existe referenciándolo a otro anterior el cual estuvo signado por la expresión “la matemática es la ordenadora del diseño e indispensable para su concreción” que, si bien nadie lo demostró, fue el estigma que marcó el camino de la racionalidad en el diseño.

Sato Kotani, en “Los tiempos del espacio” (2010) remite a la construcción epocal del mismo, pero cabe preguntarse cuál fue el papel que desempeñó la matemática en esa construcción epocal a lo largo de la historia occidental del espacio, ya que en ella se utilizó una única matemática: la geometría euclidiana y el álgebra tradicional; las cuales -junto al análisis matemático de Leibniz y Descartes- fueron la base de la lógica newtoniana, por lo cual se indagó acerca de cómo y por qué un mismo modelo matemático intervino en la construcción epocal del espacio, desde los griegos hasta mediados del siglo XX.

- b. Un segundo desafío consistió en definir los principios filosóficos, científico - tecnológicos y sociales constitutivos del nuevo paradigma, el camino recorrido desde la racionalidad hasta la complejidad y su incidencia en la configuración espacial compleja.

El abordaje de este desafío supuso encarar los conceptos sobre pensamiento complejo de Edgar Morin, las teorías en las que basó su desarrollo y las repercusiones de éstas en la arquitectura.

Desde el punto de vista científico, se han desarrollado los hitos físico - matemáticos desestabilizantes de los modelos establecidos hasta el siglo XX, el posicionamiento de la biología ante la lógica newtoniana, las Ciencias de la Complejidad y, por último, los desarrollos matemáticos utilizados en la configuración espacial de la arquitectura compleja, gracias a los avances informáticos y sus aplicaciones a la arquitectura, analizando en cada caso. la expresión arquitectónica correspondiente.

- c. Desarrollar esta temática desde la complejidad implicó el estudio holístico de la misma, por lo cual se debieron tener en cuenta, tanto las metodologías arquitectónicas que permiten la multiplicidad de respuestas derivadas de la consideración de la interrelación de las componentes constitutivas, la aleatoriedad, las propiedades emergentes, la consideración del tiempo y el movimiento; como las tecnologías que factibilizan el desarrollo de la configuración espacial compleja. Actualmente dichas metodologías la constituyen las estrategias de diseño que permiten la exploración de multiplicidad de respuestas a una problemática determinada, siendo ellas: la diagramática, los algoritmos genéticos y generativos y el diseño paramétrico.

El período temporal del presente desarrollo se encuentra comprendido entre dos hitos arquitectónicos: la exposición de 1988 del MoMa y la Bienal del 2014.

En el catálogo de la exposición del MoMA, Philip Johnson (1906-2005) expresaría que en los *“proyectos de esta exposición, el sueño de la forma pura ha sido alterado”* cada arquitecto participante de la muestra, generaba un lenguaje propio, que expresaba la crisis del sistema vigente valiéndose de la distorsión de la geometría euclidiana y de determinados preceptos de la lógica newtoniana, por ejemplo, los referidos a la independencia entre elementos de sostén y elementos sostenidos y/o diferenciación entre cerramiento y estructura.

En cambio, en 2014, mediante conferencia de prensa anterior a la apertura de la exposición, los organizadores anunciaron que el fin del evento era resaltar aquellas cosas

que los arquitectos no pueden ignorar y esperaban que se convirtiese en un punto de referencia y fuente de inspiración para la arquitectura¹.

En oposición a la exposición de 1988, Baratta y Koolhaas, en 2014, expresaron que es una exposición de arquitectura y no de arquitectos. A diferencia de las ediciones anteriores, dedicadas a lo contemporáneo “*Fundamentals*”, reivindica la historia, la evolución de la arquitectura en los últimos cien años y sus constantes.

La importancia que reviste haber seleccionado este período, se debe a los cambios que se han producido en él y que es abarcado por dos fechas en que se presentaron muestras que marcaron un cambio de postura ante la arquitectura. Es decir, nos enfrentamos a dos puntos de quiebre en el desarrollo arquitectónico: la expresión de la rebeldía ante el sistema y sus modelos históricos mediante el formalismo y el individualismo; en el 2014, Baratta y Koolhaas retoman la historia como elemento de identidad para la arquitectura y proceso de donde aprender y poder entrever el futuro de la arquitectura. En términos de la “Teoría de las Catástrofes”, se ha producido, con ambas exposiciones, una discontinuidad en el sistema.

El cambio de paradigma y la tecnología por él implementada, en el período de tiempo considerado implicó en la arquitectura, según variados autores de los cuales se referirá en esta tesis oportunamente, un vuelco sólo comparable al sufrido con la aparición de la perspectiva.

El presente desarrollo consta de tres partes:

La Parte I, corresponde al análisis de obras basadas en la geometría euclidiana y/o la lógica newtoniana, según el período considerado. El lapso de tiempo analizado en este apartado abarca desde la antigüedad clásica hasta 1988.

Se considera este lapso de tiempo por estar comprendido entre dos momentos históricos que marcaron a la arquitectura: el nacimiento y el comienzo de la gran crisis de la geometría euclidiana, sistematizada por Euclides en el siglo III a. C. pero que ya en el siglo V a. C., Pitágoras había institucionalizado al número como la verdad y la belleza,

¹ En conferencia de prensa "Bienal de Venecia 2014. "Fundamentals", Rem Koolhaas revela los últimos detalles de la exposición.

por lo cual, se llegaba a ella en el arte y en la Arquitectura, que era para los griegos “la mayor de las artes”, mediante la aplicación de las proporciones numéricas.

En las diversas secciones se mostrará cómo en distintos momentos históricos se utilizaron los conceptos matemático – geométricos respondiendo a las características epocales.

La inclusión de este apartado responde a la necesidad de diferenciar el actual paradigma de diseño del anterior y la incidencia de la matemática en ambos.

Los apartados II y III abarcan el período de tiempo que comprende esta tesis: 1988 – 2014.

La función de la Parte II es mostrar cómo la arquitectura evidenció el conflicto filosófico-científico que se desarrolló durante todo el siglo XX, atacando a la geometría euclidiana y la lógica newtoniana en las cuales se sostuvo por tantos siglos. Se produce la crisis que dará origen al nuevo paradigma de diseño.

La tercera parte constituye el nudo de la tesis en sí. A efectos de contextualizar la arquitectura compleja en el actual paradigma y los modelos en los que se asienta, en primera instancia, se desarrollan los conceptos de pensamiento complejo, diferenciándolo de pensamiento de la simplificación, en términos de Morín (1921).

Luego se desarrollarán las Ciencias de la Complejidad según Maldonado (1969), mostrando en cada caso, de qué forma las expresó la Arquitectura y se desarrollan las geometrías intervinientes en la configuración espacial de la arquitectura compleja y determinantes de su morfogénesis y estructura resistente.

En última instancia, se indaga en las estrategias computacionales para el abordaje de la configuración espacial y la estructura resistente, con los conceptos matemáticos que suponen. En este sentido, se examina acerca de sus estrategias de gestación y concreción, con sus conceptos geométrico – matemáticos asociados.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

A partir del siglo XX, los nuevos enfoques y adelantos de la ciencia y la reflexión epistemológica, encontraron al modelo científico, desarrollado hasta ese momento, insuficiente e inadecuado para simbolizar o modelizar las realidades que se iban presentando, ya sea en el mundo subatómico de la física, como en el de las ciencias de la vida y en las ciencias sociales.

En ese proceso, se hizo presente el desprestigio de la ciencia determinista, lineal y homogénea, junto al surgimiento de una ciencia con variables tales como incertidumbre, aleatoriedad, no linealidad y pensamiento sistémico, capaz de darnos explicaciones globales y unificadas.

Dados los avances científicos del siglo XX, se produce un cambio de paradigma, lo cual implica un cambio en los supuestos básicos. Para Kuhn, las revoluciones científicas son episodios de desarrollo no acumulativo en los que un viejo paradigma es sustituido total o parcialmente por otro distinto incompatible con él.

Por su parte, el filósofo y sociólogo Morín (1921), refiriéndose al concepto de paradigma científico, afirmó que éste puede definirse como un principio de distinciones – relaciones - oposiciones fundamentales entre algunas nociones matrices que generan y controlan el pensamiento, es decir, la constitución de teorías y la producción de los discursos de los miembros de una comunidad científica determinada.

Un cambio de paradigma no solamente atañe a los fundamentos del conocimiento científico. En general, nos encontramos ante una crisis de los fundamentos del pensamiento y del modo de ver al mundo, con sus estructuras, creencias, supuestos.

Esta revolución reúne aportaciones de campos muy diversos que configuran –en el sentido morineano- una perspectiva ética, una perspectiva de la construcción del conocimiento y una perspectiva de la acción. Según Morin, se necesitaba una nueva visión de la realidad, un nuevo "paradigma", es decir, una transformación fundamental de nuestro modo de pensar, de nuestro modo de percibir y de nuestro modo de valorar.

Visto desde otro ángulo, los paradigmas son modelos o patrones de comportamiento que nos permiten interactuar con el mundo. Científicos de envergadura como F. Capra, H. von Foerster, M. Gell-Mann, H. Maturana, Ilya Prigogine, I. Stengers, R. Thom, F. Varela y E. Morin, entre otros, se adentrarán en una racionalidad rupturista que abrirán el camino

a una comprensión compleja de la realidad, apareciendo la necesidad de visualizar un nuevo paradigma, el paradigma de la complejidad, en contraposición al paradigma de la simplificación.

Desarrollos teóricos y prácticos, tanto referidos a las nuevas tecnologías, como a la ciencia de las organizaciones, la ciencia política, las ciencias tradicionales, incluida la matemática, los modelos biológicos y las Ciencias de la Complejidad, han confluído en la formulación de una nueva lectura y modelización del universo.

Para la factibilización de estos desarrollos, el paradigma debió generar la tecnología que le permitiera crecer y establecerse. Basándose en ella, afianzó el sistema socio político cultural y científico contemporáneo, complejizándolo aún más.

Lo que queda claro de los promotores del Paradigma de la Complejidad es que se parte de un pensamiento sistémico en el que la interdependencia de los hechos, el azar, lo impredecible, la falta de linealidad conceptual y por añadidura, la componente temporal, y la inclusión del sujeto con su propia mirada cobran relevancia.

La concepción del proyecto, basada en el pensamiento anteriormente descrito, involucra la visión que el ser humano actual tiene de sí mismo y de su relación con la naturaleza; hecho que redundará en un mayor protagonismo de los modelos biológicos en la configuración espacial, desplazando a los modelos cartesianos newtonianos, basados en geometrías euclidianas.

Según Piñón (2005), los objetos, las ideas ya no se centran tanto en el ser humano como en la naturaleza, todo como unidad propone una visión biocéntrica, no antropocéntrica, donde el humano no tiene importancia protagónica, sino que es un organismo más del ecosistema.

En este proceso de conformación y conceptualización del paradigma de la complejidad, el epistemólogo Morín va a teorizar sobre el Pensamiento Complejo, mientras que Maldonado lo hará refiriéndose a las Ciencias de la Complejidad. Abordar el proyecto desde la óptica que aquí se expone, significó adoptar nuevas metodologías de diseño y tecnologías de gestación y concreción.

En palabras de Fraile (2019, p. 10), bajo un enfoque interdisciplinario, arquitectos, ingenieros estructuralistas, biólogos y científicos, se encuentran trabajando en conjunto,

en una búsqueda constante de mayor eficiencia, optimizando resultados, produciendo una disolución de las fronteras de la especificidad, que origina una renovación y ampliación de posibilidades. Utilizan complejas herramientas capaces de reproducir patrones formales en tres dimensiones, creando espacios arquitectónicos habitables.

Un claro antecedente para entender la obra de arquitectura como un sistema sinérgico lo constituye Christopher Alexander (1936 - 2002), quien mediante su lenguaje de patrones busca aplicar métodos científicos al problema de la forma arquitectónica. Parte de la creencia que la arquitectura más humana es aquella que se adapta a las necesidades del ser humano y sienta las bases para establecer redes de conceptos interactuantes en diseño. Un patrón define una posible solución correcta para un problema de diseño dentro de un contexto dado, describiendo las cualidades invariantes de todas las soluciones.

En realidad, Alexander construye un sistema lingüístico y matemático alrededor de las viejas ideas que diferencian el espacio con el objeto de crear un nuevo tipo de edificio. No es casual que Alexander fuese además de arquitecto, matemático: el manejo de las teorías de la complejidad, de las dinámicas no lineales y la topología con su búsqueda de propiedades invariantes en la transformación de superficies y volúmenes, le han permitido desarrollar una teoría arquitectónica en base a los presupuestos científicos del nuevo paradigma, al tiempo que sentó las bases para un gran adelanto de la informática, por lo cual ha sido reconocido como el “padre del movimiento” (*pattern language*) en ciencias de la computación.

Cuando Alexander plantea su teoría, está hablando de interdependencia de variables pertenecientes a un hecho sinérgico y para ello se valdrá de los diagramas matemáticos de Venn y de la Teoría de Grafos.

A fines de la década del '80 del siglo XX, con una fuerte connotación filosófica, hace su aparición en escena el *deconstructivismo* en arquitectura que expresó, mediante la negación de la geometría euclídea, la crisis de los modelos establecidos, imponiendo a sus obras las características de la geometría fractal: fragmentación, impredecibilidad, no linealidad. Mediante la manipulación geométrica, distorsiona y disloca algunos de los principios elementales de la arquitectura, tales como la estructura y la envolvente del edificio.

A pesar de la apariencia de los edificios de la escuela deconstructivista, éstos no pertenecen al paradigma de la complejidad, pues tampoco fueron generados como

sistemas dinámicos caóticos. Para producir una arquitectura conceptualmente distinta, se debió pensar el espacio arquitectónico como la interacción de vectores convergentes hacia él, concebidos desde una ideología basada en los modelos científicos vigentes y no, simplemente, en una morfología que evidencie una crisis.

La herramienta creada por el nuevo paradigma, a efectos de factibilizar una nueva mirada sobre la arquitectura y su complejización, fue la informática, pero utilizada ya no como herramienta de dibujo, sino de generación y diseño.

El Museo Guggenheim de Bilbao (inaugurado en 1997) es el primer edificio factibilizado gracias a la utilización de tecnología digital, dada la complejidad de su geometría.

Según Dennis Dollens (2002) en *De lo digital a lo analógico* expresa que el Guggenheim de Bilbao fue creado por un arquitecto que no piensa en términos digitales. Gehry utiliza maquetas digitales tridimensionales que posibilitan ver el edificio antes de construirlo, con objeto de generar la información que permita su desarrollo constructivo. Es decir, utilizaba los medios digitales exclusivamente para graficar y visualizar ideas.

En esos años, arquitectos como Greg Lynn, Ben Van Berkel, Alejandro Zaera-Polo o Winny Maas, comienzan a difundir las posibilidades formales que brinda la tecnología.

En ninguno de los casos mencionados se operaba bajo los conceptos del paradigma de la complejidad, es decir que aún la obra de arquitectura no se concebía en los términos de los modelos científicos del siglo XX, generados en base a los procesos biológicos y a las metáforas de las teorías de la Relatividad de Einstein, la del Campo, la de la Gestalt y la de los Sistemas, siendo que todas estas teorías se adentran en las interrelaciones entre componentes coactuantes de un todo organizado.

Al pasar de los años, el grupo MVRDV se ocupó de documentar las investigaciones que realizó para cada encargo y en las que consideró, no sólo variables arquitectónicas y/o tecnológicas, sino otras como culturales, sociológicas y ecológicas, siendo éste el caso de “*KM³ Excursions on Capacities*”².

² MVRDV (2005) “*KM³ Excursions on Capacities*” Editorial: Actar; Edición Har/DVD

En la 11ª Edición de la Bienal de Arquitectura de Venecia en el 2008, Patrik Schumacher, presentó: *Parametricismo as style – Parametricist Manifesto*, este hecho marcó el nacimiento formal del *parametricismo*.

Dejando de lado la discusión sobre la validez de hablar de estilo, conforme al manifiesto, el *parametricismo* se define como el nuevo estilo arquitectónico y sus sistemas asociados para obtener nuevos modelos urbanos y arquitectónicos que respondan a la multi-centralidad y la complejidad de la sociedad actual, formada por numerosas capas y continuamente diferenciada.

Según Schumacher (2008), el Parametricismo instauro el concepto de Arquitectura Paramétrica enunciando los principios en los que se funda:

1. El empleo de las lógicas que emergen de las herramientas informáticas abren nuevos caminos de creatividad al emplearlas en el diseño.
2. La creación de una naturaleza distinta basada en la ley de correlación de todos los parámetros.
3. La creación de especies innovadoras, de un nuevo orden complejo y como resultado una nueva belleza.

El objetivo es llevar al máximo las interdependencias y convergencias internas en un mismo diseño arquitectónico, como las afiliaciones externas y continuidades dentro de los complejos contextos urbanos.

Algunos conceptos relevantes enunciados en el manifiesto son, según Gardinetti (2016):

1. El estadio actual del parametricismo se relaciona con el continuo avance de las tecnologías de diseño computacional ya que sus posibilidades formales y organizativas se deben al criterio del diseñador.
2. El parametricismo emerge de la exploración creativa de sistemas de diseño paramétrico con vistas a articular una creciente complejidad de procesos sociales e instituciones.
3. El sentido de la complejidad organizada (gobernada por leyes) hace que el parametricismo trabaje de forma similar a los sistemas naturales, donde todas las formas son el resultado de fuerzas que interactúan según leyes. Igual que en los sistemas naturales, las composiciones paramétricas están tan integradas que no pueden ser descompuestas en subsistemas independientes, una gran diferencia en comparación con el paradigma de diseño moderno de clara separación de subsistemas funcionales.

Schumacher, a lo largo de su carrera, ha desarrollado actividades que lo han vinculado con diversas disciplinas. Con profundos conocimientos filosóficos, admite que, para sus conceptos de *Autopoiesis*, encontró inspiración en trabajos del sociólogo alemán Niklas Luhmann y los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela, científicos fundamentales en el desarrollo de la Teoría de los Sistemas.

Para Sánchez Morales (2015), la *Autopoesis de la Arquitectura*, es un extenso tratado cuyo objetivo principal es presentar un discurso global de la arquitectura, generado desde el interior de la disciplina, señalando que el espíritu y misión de su libro, es producir un impacto en la arena arquitectónica por medio de la presentación de un sistema teórico integral.

Schumacher, además de ser director del *Design Research Lab* (DRL) de la *Architectural Association* en Londres y profesor en varias universidades europeas, fue socio de Zaha Hadid. En este punto debemos considerar que Hadid se graduó en Matemática, antes de cursar sus estudios de arquitectura, por lo tanto, se podría aventurar que su formalismo se basa en un profundo conocimiento de la geometría que utiliza.

Simultáneamente con el proceso descrito, y en continua retroalimentación con la arquitectura, comienzan a aparecer *softwares* matemáticos y geométricos que permitirán manipulaciones geométricas y algebraicas que, específicamente en geometría, han llevado a la crisis a los métodos tradicionales de demostraciones analíticas. Estos *softwares* serán implementados en los equipos de diseño de los grandes estudios de arquitectura, cuyo plantel contará con la presencia, entre profesionales de distintas disciplinas, de matemáticos.

Al decir de Soto González (1999: 2), abordar una temática desde la complejidad implica pensar en términos organizacionales, y no en términos absolutos / identitarios / reduccionistas / excluyentes. La complejidad es relación y es inclusión; ni siquiera excluye la simplificación, sino que la integra como uno de los elementos del pensamiento complejo, siendo multidimensional y englobadora, es abierta e inclausurable (complejidad es incompletud). La complejidad es incertidumbre y en ella priman las estrategias a los programas.

Las estrategias implementadas por la arquitectura compleja, asociadas a aplicaciones informáticas, implican multiplicidad de caminos a seguir que permiten el acceso a un

amplio abanico de respuestas para una misma problemática (ya no una única solución), derivadas de la dependencia sensible de variables intervinientes (entendida según la teoría del caos).

Abordar el proyecto desde la concepción contemporánea significó, para los arquitectos, adoptar y reelaborar estrategias de diseño, vehiculizadas por las nuevas tecnologías, siendo ellas: los diagramas, los algoritmos genéticos y generativos, el diseño paramétrico, la tecnología BIM y la fabricación digital.

En su libro *Del diagrama a las experiencias, hacia una arquitectura de la acción* del 2014, Montaner realiza una refundación teórico práctica de la arquitectura que se da a partir de la vinculación explícita de tres ejes instrumentales ligados a ella: los diagramas, las experiencias y las acciones. Por medio de la exploración de conceptos, herramientas y casos prácticos emblemáticos, Montaner disecciona, por un lado, el carácter abstracto de las creaciones arquitectónicas que han sido proyectadas a través de los diagramas; y, por otro, la complejidad de las experiencias vivenciales y la intencionalidad de las acciones de colectivos y creadores que buscan una intervención activa y ética sobre la realidad.

Los arquitectos encontraron en los diagramas una metodología de trabajo que les permitió manejar la complejidad que supone la obra de arquitectura, entendida como sistema caótico dinámico.

Toyo Ito (1941), escribiendo sobre la obra de Kazuyo Sejima en 1991, introdujo el concepto de “arquitectura diagramática” asegurando que se trata de un proceso complejo que describe la multiplicidad de condiciones de un proyecto de arquitectura. El diagrama se introduce como un instrumento de pensamiento, que busca resultados operativos, capaz de formular estrategias.

Según el *Diccionario Metápolis de Arquitectura Avanzada*, el diagrama es la representación gráfica del curso de un proceso dinámico sintetizado mediante comprensión, abstracción y simulación. Juega un doble papel: es un modo de notación - de análisis, de reconocimiento, de reflexión-, pero también es una máquina de acción - generativa, sintética, productiva-. (Gausa , 2015).

Según el Diccionario de Oxford, un diagrama es “un dibujo simplificado que demuestra la apariencia, la estructura o el funcionamiento de algo, una representación

esquemática”³. Mientras que Stan van der Maas (2011) en *El diagrama en la arquitectura* afirmó que el diagrama es un instrumento para introducir estructuras de organización como entidades autónomas en el proceso de diseño; Federico Soriano (2008) en su texto *Algunas definiciones de la palabra diagrama* afirma que la arquitectura diagramática es la construcción de un proceso de constante ida y vuelta o de producción e interpretación, mediante la transcripción de los datos que manejamos para un proyecto en parámetros. Parámetros que manipulamos y podemos volver a transformarlos en arquitectura. En el proceso descrito por Soriano, la matemática va a intervenir en la gestación y concreción de la arquitectura a través de la variabilidad de las gráficas de las funciones intervinientes en la morfogénesis, derivadas de los desarrollos de la geometría algebraica, diferencial y topología.

Respecto al *diseño paramétrico*, se basa en la generación de geometría partiendo de la definición de una familia de parámetros iniciales y la programación de las relaciones formales que guardan entre ellos. Consiste en la utilización de variables y algoritmos que permiten generar un árbol de relaciones matemáticas y geométricas, conducentes a plantear las posibles soluciones permitidas por la variabilidad de los parámetros y no, una única alternativa.

Al respecto, Branco Kolarevic (2003), entiende que los procesos generativos digitales han abierto nuevos territorios para la exploración conceptual, formal y tectónica, proponiendo una morfología arquitectónica centrada en las propiedades emergentes y adaptables de la forma. El énfasis se desplaza de la “construcción de la forma” hacia el “descubrimiento de la forma”, procesos a los que inducen intencionalmente diversas técnicas generativas basadas en lo digital. En el reino de la forma, lo estable es sustituido por lo variable, la singularidad por la multiplicidad.

Dentro de la formulación realizada por Kolarevic asumen un papel fundamental los *algoritmos genéticos y generativos* en la formulación del espacio, como emergente de las interrelaciones de sus componentes constitutivas.

³ Diccionario de Oxford, versión online: <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles-espanol/oxford>.

Los algoritmos genéticos son entendidos como métodos para la resolución de problemas en búsqueda de la optimización, perteneciendo a la categoría de algoritmos evolutivos, basándose en los procesos biológicos de optimización de las especies.

Utilizando conceptos matemáticos se analizan y se caracterizan las variables intervinientes en el proceso de diseño, al igual que las relaciones entre las mismas, establecidas por los diagramas.

Los algoritmos generativos brindan multiplicidad de soluciones geométricas y morfológicas partiendo de condiciones iniciales. Espacialmente, esas relaciones y caracterizaciones de variables se materializarán en el diseño mediante geometrías espaciales, la factibilización constructiva de las mismas son permitidas por las nuevas tecnologías de concreción.

Las herramientas que permiten la gestación y construcción colaborativa de las obras de arquitectura compleja, donde es indispensable la intervención de conceptos matemáticos y multiplicidad de agentes decisorios son: la tecnología BIM (por sus siglas, *Building Information Modeling*) y la fabricación digital.

La *Tecnología BIM*, está constituida por un conjunto de *software* para la gestión de la obra desde la generación del diseño, concreción y seguimiento de la obra hasta su demolición; permitiendo crear simulaciones digitales a partir de la información total del proyecto dando paso a multiplicidad de soluciones.

Resulta concluyente para el abordaje de la obra arquitectónica considerada como un sistema de variables interdependientes dadas sus características: el diseño paramétrico y la bidireccionalidad asociativa, que conlleva la interoperabilidad entre aplicaciones, utilizando, no sólo representaciones gráficas, sino alfanuméricas

BIM es una tecnología que aparece en el diseño industrial permitiendo la experimentación con relaciones de interdependencia en la creación de los objetos y es tomada por la arquitectura para el desarrollo de sus propios objetos.

Coloma Picó en “Introducción a la tecnología BIM” (2008) refiere a que la utilización de la tecnología BIM, ha producido un cambio de paradigma en el campo del diseño por el cual ya no se utilizan los *softwares* de dibujo como una herramienta de representación gráfica, sino como medio de diseño.

La importancia del uso de tecnología informática, es la posibilidad de considerar durante el proceso de diseño, la concreción y el seguimiento, a la obra como un todo sinérgico, mostrando las interacciones de cada una de sus variables, posibilitando esto su optimización.

Según el tema que nos ocupa, la significación de la aplicación BIM es que mediante su utilización y la definición de pautas iniciales de diseño, sería posible abordar la gestación y concreción del hecho arquitectónico como un sistema dinámico caótico abriendo el abanico de soluciones, por considerar la dependencia sensible entre las variables interactuantes del proyecto.

Englobando los conceptos anteriores, encontramos la *fabricación digital* entendida como el conjunto de procesos integrados mediante los cuales se elabora un producto a partir del diseño y modelado del objeto en *softwares* CAD (diseño asistido por computadora), el análisis del mismo en un programa CAE (ingeniería asistida por computadora), la simulación del proceso de fabricación en paquetes CAM (fabricación asistida por computadora) y la manufactura del producto por medio de algún equipo.

La nueva forma de pensar el espacio a la luz de la complejidad, unida a las estrategias enunciadas anteriormente, afectarán al elemento que a lo largo de la historia de la arquitectura, cumplió su función de sostén. En 2002, el ingeniero Cecil Balmond presenta su libro “Informal” y declaró que su trabajo va más allá de la simple generación de geometrías innovadoras, procuró forzar los límites de la ingeniería.

En este mismo sentido, según Koolhaas, Balmond ha movido, prácticamente sin ayuda, el terreno de la ingeniería –un lugar donde la tierra rara vez se mueve– y por eso ha permitido a la arquitectura ser imaginada de forma diferente (en Sánchez Vázquez, 2010). Definitivamente desaparece la estructura portadora de una única función, la de sostén, para constituirse en una variable más de la gestación espacial.

Las estructuras dinámicas constituyen un sistema en sí mismo y de orden nodal dentro de un sistema complejo mayor. Es decir, las leyes que rijan al sistema espacial, afectarán al sistema estructural y viceversa, configurándose un todo indivisible, proveyendo la geometría, la factibilidad y optimización de los mismos (Quevedo y Letelier, 2010).

En la generación y concreción del espacio con su estructura de sostén, tal como la describimos, la matemática deberá abandonar, en gran parte, la linealidad y la geometría euclidiana, el modelo matemático del espacio multidimensional habitable, lo conformará

el espacio vectorial. Los programas informáticos que posibilitan la representación de dicho espacio, también se basan en espacios vectoriales y sus propiedades booleanas.

El modelo matemático del espacio habitable, pasa a ser el espacio vectorial, destruyendo al modelo matemático del espacio tridimensional cartesiano. El espacio vectorial permite trabajar con espacios n – dimensionales; por añadidura, la geometría fractal incorporará la dimensión fraccionaria. Conceptos, ambos, impensados en la lógica newtoniana.

Al respecto, en 1989, el fisicomatemático Penrose en *La mente nueva del emperador* (1996) enunciará que el hecho de que la geometría euclidiana parezca tan precisa para reflejar la estructura del “Espacio” de nuestro mundo nos ha engañado haciéndonos pensar que esta geometría es una necesidad lógica, o haciéndonos pensar que tenemos una intuición innata *a priori*, de que la geometría euclidiana debe aplicarse al mundo en que vivimos.

Las nuevas formas arquitectónicas, asociadas a la capacidad de dar respuesta a diferentes estímulos, ya sean intrínsecos a la obra misma o al del medio, se van alejando de la geometría euclidiana y del espacio cartesiano, para intentar experimentar con una geometría topológica, de superficies curvas, que utiliza NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), desplazando a los volúmenes discretos y adoptando teorías y conceptualizaciones de las más diversas disciplinas.

En la conceptualización de la temática digital, no se puede dejar de mencionar los volúmenes de “Arquitectura Digital. Nuevas aplicaciones” de Dimitris Kottas (2013), en los que realiza la recopilación de proyectos basados en el diseño paramétrico, desglosando su generación geométrica y el desarrollo de la aplicación informática. Branco Kolarevic (2003), ha desarrollado arquitecturas computacionales y morfogénesis digital, convirtiéndose en un referente de las nuevas formas de abordaje del espacio arquitectónico, utilizando geometrías no euclidianas.

En Argentina es de destacar el trabajo del Dr. Mauro Chiarella de la Universidad Nacional del Litoral, el cual dicta el curso “Laboratorio de Representación e Ideación (RI.Lab)” en el marco de la Maestría en Arquitectura proponiendo *un espacio de reflexión y experimentación de los recursos tecnológicos aplicados la proyección arquitectónica*.⁴ Chiarella se especializa en el Diseño Paramétrico - Fabricación Digital, desarrollando el

⁴ Chiarella, Mauro. Presentación de la Maestría. http://ludion.org/instituciones.php?institucion_id=30

tema: “Materialidad digital para pieles y envolventes arquitectónicas. Estudio y relevamiento de procesos tecnológicos innovadores para la ideación y manufactura de prototipos experimentales”.

Por último, cabe mencionar que, cotidianamente, las redes informáticas nos permiten tanto el acceso a las páginas de los más destacados estudios y arquitectos, analizar sus obras, fundamentos, metodologías y tecnologías, dándonos acceso a los avances y cambios constantes de la disciplina, como a las bibliotecas virtuales de *software* de diseño.

OBJETIVOS:

El objetivo general es el de realizar un aporte a la “Teoría de la Arquitectura Compleja”, referido a la incidencia de la aplicación de la matemática en el diseño, teniendo presente los modelos científicos vigentes. Para ello se pretende como objetivos particulares:

1. Analizar las variables tenidas en cuenta, históricamente, en función de las cuales se utilizó la matemática;
2. Examinar las interacciones entre variables constitutivas del proyecto generado desde la complejidad;
3. Contextualizar teórica y científicamente la arquitectura actual en las concepciones del Paradigma de la Complejidad;
4. Establecer relaciones entre la arquitectura, la lógica científica biológica y las geometrías no euclidianas de configuración espacial;
5. Estudiar la incidencia de las nuevas tecnologías en la topología, la morfogénesis y la resolución estructural y espacial;
6. Ensayar el establecimiento de relaciones entre la geometría algebraica y diferencial, incluyendo la topología diferencial y la morfogénesis;
7. Ampliar el marco teórico correspondiente a las interrelaciones arquitectura – matemática.

PARTE I:

**POSICIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA EN LA
ARQUITECTURA HASTA LA PRIMERA MITAD DEL
SIGLO XX.**

I.1. LA ANTIGÜEDAD CLÁSICA

ANTECEDENTES

Un claro ejemplo de que los entes geométricos surgen en las civilizaciones antiguas de occidente por una simple necesidad práctica, lo encontramos en Egipto en el hecho de las mediciones de las tierras ante las inundaciones causadas por el Nilo.

Será con esa misma geometría que estas civilizaciones intentarán interpretar a la naturaleza; basados en la observación y el misticismo, leerán leyes en el macrocosmos que intentarán recrear al formular su microcosmos.

Siendo la escuadra y el compás los únicos instrumentos con los que contaba para dicha recreación, con ellos obtenía tanto lo conmensurable como lo inconmensurable del universo; lo primero se factibilizaba mediante razones (fracciones entre números enteros) formuladas entre números enteros y lo inconmensurable, mediante la representación de los irracionales presente en el número de la vesica piscis: .

La vesica piscis se obtiene al trazar dos circunferencias de igual radio, donde el centro de una se encuentra en la circunferencia de la otra. Fue utilizada para la determinación de los puntos cardinales y en concordancia con ellos, la ubicación y orientación en el terreno de templos, tumbas e inclusive para el trazado del cardo y decumano romano o la ubicación del altar en las catedrales góticas.

La referencia más antigua que tenemos del ritual del trazado en un terreno de la vesica piscis data del siglo XV a.C. y está escrito en sánscrito.

Otras aplicaciones de esta construcción geométrica son la obtención del ángulo recto y los ángulos de 30, 45 y 60 grados y el ángulo recto.

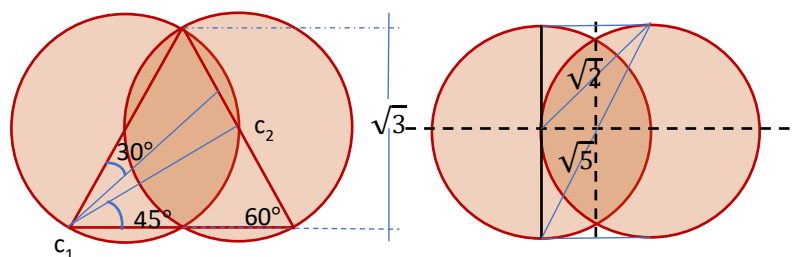


Fig.1: Vesica piscis. Trazado de irracionales y ángulos a partir de ella.
Fuente: Elaboración propia.

Si bien podemos decir que al menos desde tiempos del Antiguo Egipto, se encuentra presente la matemática en la producción arquitectónica con el trazado y ubicación de las pirámides, fueron los griegos los que quienes elaboraron un sistema matemático con los conceptos que ya se utilizaban en forma empírica, aplicándolo a la arquitectura.

GRECIA: INTERPRETACIÓN DEL PERFECTO ORDEN DEL UNIVERSO MEDIANTE LA GEOMETRÍA

A partir de Pitágoras, en el siglo V a.C., con su concepción mística del número y de la sistematización que realizara Euclides, en el siglo III a. C., de los conceptos de astrónomos y matemáticos que le precedieron, se ubica a la matemática en un lugar de irrefutabilidad. A partir de ese momento, será la geometría la encargada de interpretar el perfecto orden del universo y la herramienta capaz de generar y ordenar el espacio arquitectónico según el orden establecido.

Pitágoras realizó, entre otros, dos descubrimientos que marcarían hasta nuestros días la cultura occidental: el primero de ellos es la existencia de una estrecha relación entre la armonía musical y la armonía de los números enteros, relación que contribuyó a confirmar que el universo se regía por el número y dios estaba en él, concepto que aparentemente, incidirá inclusive en el trazado de la fachada de la catedral gótica, como se verá más adelante.

El otro descubrimiento refiere a la relación entre la diagonal y el lado de un pentágono regular, esta proporción se enlaza con lo inconmensurable pues depende de un número irracional que se dio en llamar, “número de oro”. Doscientos años después, Euclides en su tratado de geometría abordaría el tema de la división de un segmento en media y extrema razón a la que denominará “proporción armónica”, dependiendo del *número de oro*. Esta proporción se mantendrá presente en la arquitectura y el arte a lo largo de la historia, respondiendo a la cosmovisión vigente en el momento en que se lo aplicaba.

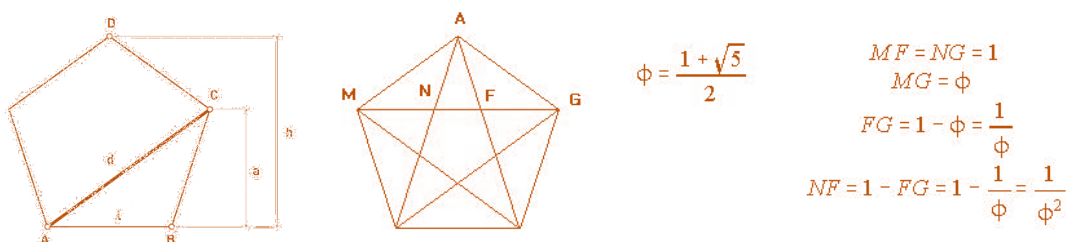


Fig. 2: Pentágono estrellado y número de oro.
Fuente: Elaboración propia.

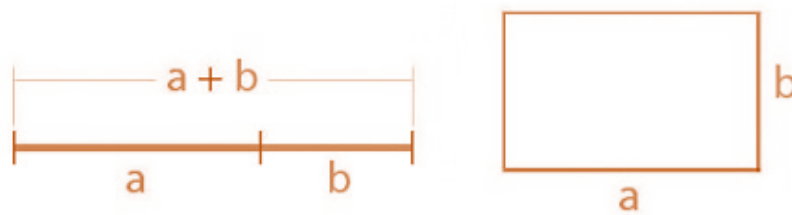


Fig. 3: División de un segmento en media y extrema razón, según Euclides S. III a.C.
Fuente: Elaboración propia.

Son creencias pitagóricas, extendidas en el mundo helénico, que la salud, la belleza y la perfección de las formas, dependen de la proporción numérica; detrás de la belleza se halla siempre el número. El arte se constituye con proporciones y la proporción se encuentra en el número. Al considerar los griegos a la Arquitectura la mayor de las Bellas Artes no habrá Arquitectura sin proporciones.

Esta concepción de unicidad y absoluto entre el número, la verdad y la belleza, incidía en la concepción de la arquitectura. Tal como aseveró Huyghe (1966), a mediados del primer milenio a.C., Grecia había concebido la belleza como una realidad espiritual, existente en sí misma, un ideal al que todo artista debía acercarse lo más posible. Por otra parte, al hacer de la belleza una verdad absoluta, la situaba por encima de todo lo que las circunstancias y el ser humano podían tener de variable y particular. No solo existe la belleza, sino que era universal.

La belleza, al igual que la verdad, son únicas y están regidas por el número; de la misma manera, en arquitectura existe un único espacio para cada función y la organización de la misma, responderá a la actividad que en él se desarrolle, obedeciendo a las necesidades de la Polis: el ágora, la acrópolis, el teatro, etc.

En Europa, la arquitectura griega contaba con unos componentes básicos para sus hitos urbanos en los siglos V y III a.C. Era una arquitectura para percibirla desde la lejanía valorando la proporción, la escala y su compenetración con el entorno. El espacio interior no conservaba relación con el exterior. Ante todo, la arquitectura respondía a funciones relativas a la *Polis*.



Fig. 3: Configuración espacial en función de la Polis.
Fuente: Gráfico de Norberg Schultz, 1999, p. 36.

La concepción por la cual la belleza estará íntimamente ligada al número y las proporciones, predominará en el pensamiento filosófico, con influencia en la configuración espacial, hasta fines del Renacimiento, no así la unicidad del espacio.

Para Aristóteles, la materia y la forma constituían los dos principios esenciales de todo cuerpo. La forma es la que determina las propiedades esenciales de las cosas, es independiente de la materia y es bella cuando existe orden, precisión y determinadas proporciones entre sus partes y el todo.

Según Cardellach (1970), el proceso de formalización consistió en ordenar y organizar la materia, basándose en su ser esencial y estaba regido por leyes exclusivamente formales, como el orden y la proporción, ajenas totalmente a la materia y al tamaño. La forma era, por lo tanto, independiente de la materia.

La arquitectura, si pretendía ser bella, debía reproducir a la naturaleza y siguiendo las ideas de Aristóteles, debía tomar de ella sólo algunas leyes o principios esenciales, representando así al orden cosmológico perfecto y supremo.

Según Fontana Cabezas (2012, p. 30), la forma y materia se encontraban completamente disociadas en el proceso de diseño arquitectónico clásico. La búsqueda de la belleza era una búsqueda de dominio de las reglas formales, fundamentalmente de la regla de las proporciones. La naturaleza era el principal referente y la materia que componía a las obras arquitectónicas no tenía ningún tipo de incidencia en este proceso de búsqueda de la belleza.

En este esquema, la estructura formaba parte de un sistema formal y serán los órdenes arquitectónicos, mediante las proporciones, los encargadas de dotar de belleza a cada elemento, sea o no estructural, basadas en las proporciones y formas humanas.

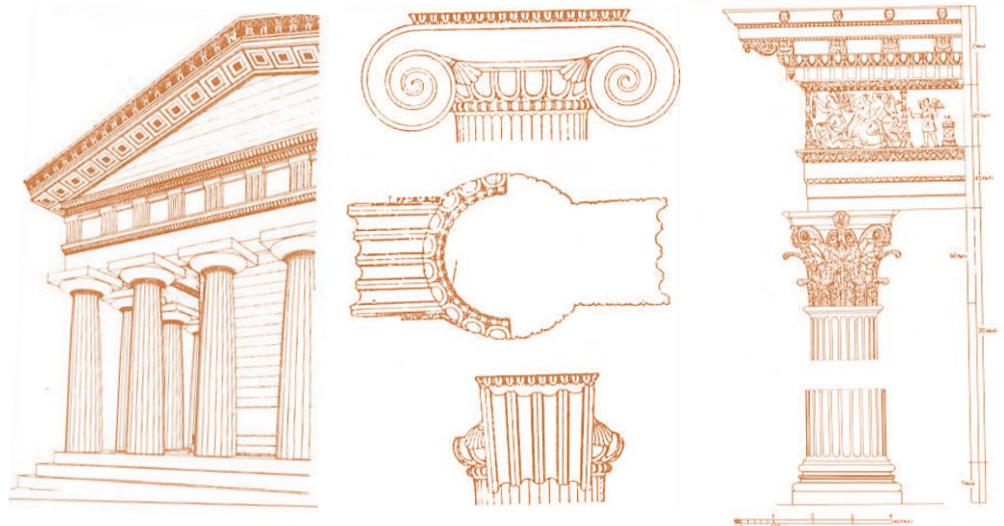


Fig. 4: Templo de Era: Dórico. Antiguo Artemisión: Jónico Monumento de Lisicrates: Corintio. Órdenes griegos.

Fuente: Gráfico de Christian Norberg Schultz. GG Barcelona 1999.Pag. 29

La utilización de la geometría en la obra de arquitectura, como elemento de justificación de armonía y belleza, trascendería a esta civilización por más de dos mil años; siempre, por supuesto, obedeciendo y transmitiendo los cánones imperantes del momento histórico vigente.

El sistema estructural trilitico por ellos utilizados, debía responder a las proporciones de armonía del todo y contribuir a su forma.

Podemos rastrear la concepción de la definición de un espacio determinado para una actividad específica, en el lenguaje griego en el que no existe el vocablo “espacio”, es decir, no existe una única concepción del término, sino que es específica para cada caso.

ROMA: GEOMETRÍA Y TECNOLOGÍA EN FUNCIÓN DEL PODER

CONTEXTUALIZACIÓN

Con la expansión de Roma en torno al mediterráneo, el Imperio Romano llegará a extenderse desde el océano Atlántico al oeste, hasta las orillas del mar Caspio, el mar Rojo y el golfo Pérsico al este, y desde el desierto del Sahara al sur, hasta las tierras boscosas a orillas de los ríos Rin y Danubio y la frontera con Caledonia al norte.

La historia de Grecia antigua propiamente dicha se detiene en la toma de Corintio por Mímmius en el 146 a. de C. A partir de ese momento, el foco del mundo antiguo lo pasa a ocupar la península itálica, con centro en Roma.

Pueblo conquistador, sus preocupaciones no se volcaban tanto hacia la filosofía y el mundo ideal, que aprenderían de los griegos, sino a lo concreto de su expansión y las leyes para gobernar las tierras conquistadas. En pos de esta, y de visibilizar su poderío, desarrolló una tecnología innovadora para la época, transformando técnicas y métodos constructivos del mundo griego, a efectos de perseguir sus fines.

Apoyándose en esta ideología, se trazó una red de caminos con centro en Roma, lo cual se puede leer como la apropiación del espacio exterior urbano, señalando el poderío romano.

En la apropiación de ese espacio exterior, cuando se consagraba un “sitio”, se lo hacía mediante el empleo de la geometría. El carácter ortogonal de los dos ejes compositivos principales se determinaba mediante la utilización del trazado de la vesica piscis, por lo cual estos ejes marcaban los puntos cardinales. Recuérdese que el trazado de esta se basaba en la sombra proyectada de un gnomon sobre el terreno con la salida del primer rayo de sol.

Roma, al expandirse mostró su poderío a través de la supremacía militar y la tecnológica, implementada en caminos, puentes, acueductos, y edificios hasta el momento inexistentes como las termas, la basílica o el circo.

Si bien se aceptará desde un primer momento los cánones de belleza imperantes en el mundo helénico, se imprimió una impronta en la configuración del espacio, continuando

con la primacía de la geometría como elemento ordenador del espacio símbolo de armonía y belleza.

Vitrubio (80-70 a.C.-15 a.C.) -autor del tratado más antiguo sobre arquitectura que se conserva y el único de la Antigüedad Clásica-, se inspiró en teóricos helenos, por lo que las proporciones y la simetría seguirían íntimamente ligadas con la belleza.

“La Simetría surge a partir de una apropiada armonía de las partes que componen una obra; surge también a partir de la conveniencia de cada una de las partes por separado, respecto al conjunto de toda la estructura. Vitrubio”⁵ (Vitrubio, 23 a. C. a 27 a. C., p. 10).

“La disposición de los templos depende de la simetría, “... La simetría tiene su origen en la proporción ... La proporción se define como la conveniencia de medidas a partir de un módulo constante y calculado y la correspondencia de los miembros o partes de una obra y de toda la obra en su conjunto.”⁶ (Vitrubio, 23 a. C. a 27 a. C., p. 35).

La geometría, tratada según los cánones establecidos socialmente, será la encargada de imprimir seguridad y rigurosidad en el trazado de la configuración espacial del espacio, mientras que la estructura resistente encontrará nuevos caminos surgidos de las innovadoras tecnologías. Al mismo tiempo, el ser humano se transformará en “actor del espacio” en palabras de Norberg-Schultz (1999, p. 45).

El Panteón de Agripa

Con el Panteón, los romanos introducen una nueva dimensión del espacio interior, en él se encontrará la expresión de su cosmovisión. Una cúpula cuyo límite es el cielo a través de su óculo superior, representa el supra mundo, apoyado en un tambor inferior: el

⁵ Vitruvio Capítulo 2 Libro I (23 a 27 a. C.) “Los diez Libros de Arquitectura Marco Lucio Vitruvio Polion” Disponible en internet

https://www.u-cursos.cl/fau/2015/0/AO104/1/foro/r/1_Vitrubio_Los_diez_Libros_de_Architectura.pdf

⁶ Vitruvio Capítulo 1 Libro III (23 a 27 a.C) “Los diez Libros de Arquitectura Marco Lucio Vitruvio Polion” Disponible en internet

https://www.u-cursos.cl/fau/2015/0/AO104/1/foro/r/1_Vitrubio_Los_diez_Libros_de_Architectura.pdf

submundo; además, por primera vez, se erige un templo para todos los dioses y no para una única divinidad como hacían los griegos.

Compositivamente, por primera vez, se presenta un pórtico que recuerda a los templos griegos, con un volumen de planta circular. Este pórtico representa, además, la articulación del espacio exterior con el interior.

Presenta dos ejes, uno longitudinal que atraviesa la planta desde el pórtico, y concluye en un ábside del espacio central, siendo eje de simetría y otro vertical va desde el centro del óculo al centro del solado del tambor.

Constructivamente, se materializa por primera vez en la historia una cúpula autoportante a compresión de 43,44 m de diámetro; un óculo superior permite que las tensiones de la cúpula no alcancen valores que harían colapsar la estructura.

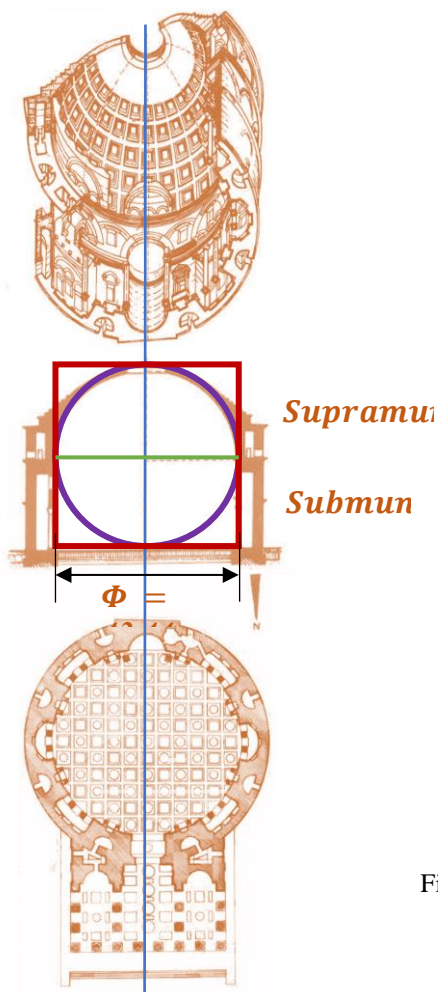


Fig.5: El Panteón Romano: espacio, tecnología y cosmovisión.
Fuente: Fuente: Elaboración propia.
sobre gráfico de Norberg-Schultz, 1999, p. 53.

Expresando los esfuerzos actuantes sobre la cúpula, desde una mirada newtoniana, se podría realizar el siguiente razonamiento: matemáticamente el valor de la tensión, se obtiene de la división entre la fuerza actuante y la superficie de incidencia y se tendrá:

Lógicamente, a medida que se van superponiendo las hiladas, la tensión entre los elementos que la conforman aumenta ya que disminuye la sección de incidencia de la fuerza. Si hubiesen cerrado la cúpula, en vez de colocar el óculo, la superficie de incidencia sería nula, es decir, el límite de la expresión matemática es infinito, lo cual se corresponde con un grado de tensión inadmisibile haciendo imposible su concreción.

Lo descrito, constituye un logro tecnológico en sí, a lo que se debe sumar que desde el punto de vista del diseño, la masa de luz variable, debido al movimiento de la tierra que invade el espacio circular, en conjunción con las sombras de los nichos y el casetonado de la cúpula, transforman un espacio estático de planta circular, en un espacio dinámico y cambiante.

La concreción del Panteón fue posible por las tecnologías implementadas en él, puesta a disposición de comunicar una cosmovisión determina, lenguaje determinado por la geometría.

Todo posee una posición según un orden cósmico, en el que todas las partes y sus formas, tamaños, posiciones, colores y texturas quedan establecidas de manera unívoca. Ese control se realiza por medio de la geometría, que es la que dota al conjunto de esa estructura profunda que da forma al edificio y posiciona sus elementos (Montero Fernández, 1994).

Los romanos, con el Panteón corporizan la concepción: *“Así en la tierra como en el cielo”* presente en toda la Antigüedad

Las Termas

Otro símbolo arquitectónico de poderío del Imperio lo constituyeron las termas públicas romanas que respondían a una función social y política. Una vez más se ve al ser humano como actor del espacio, al igual que en el Panteón.

Lo que permitió generalizar el uso de las termas en el mundo romano fue el descubrimiento del ingeniero Cayo Sergio Orata, en el siglo I a. C. de un sistema que permitía calentar y distribuir aire caliente.

La geometría marcada por la simetría y las proporciones están a disposición de una generación espacial factibilizada por la tecnología.

Estas construcciones ponían de manifiesto la superioridad del Imperio sobre los pueblos conquistados en los que las termas se levantaban. Las construcciones alcanzaron su máxima expresión en las termas de Caracalla del siglo II d. C.

El edificio principal presentaba un riguroso eje de simetría y sumatoria de espacios con independencia de perspectiva en los distintos recintos.

La organización espacial de las Termas de Caracalla tenía configuración central; los elementos estaban agrupados, en función a ejes principales, en torno a un elemento central de mayor jerarquía.

El espacio de mayor jerarquía, considerado el núcleo del edificio, de mayor altura y cubierto por tres bóvedas de arista, es el espacio donde se cruzan los ejes de simetría.

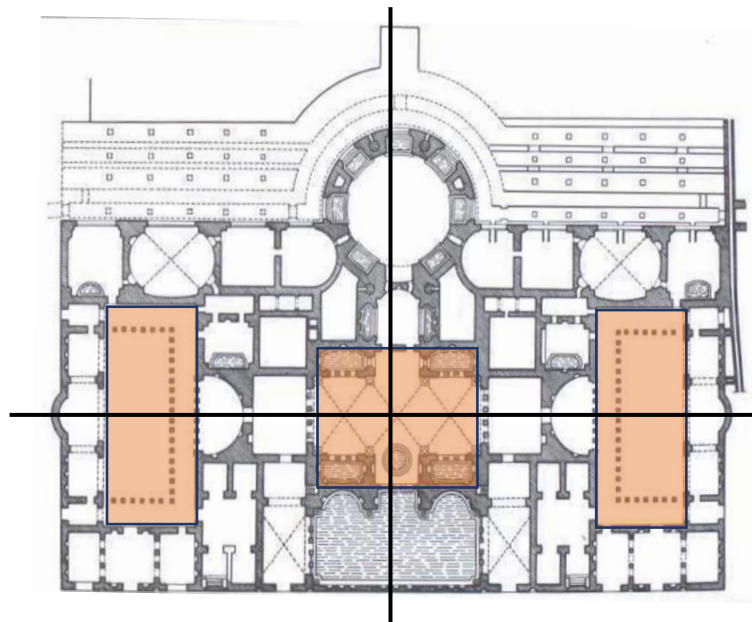


Fig. 6: Termas de Caracalla. Ejes y composición geométrica
Fuente: Elaboración propia
sobre Reconstrucción del plano de las Termas de Caracalla
Fuente: realizada por Norberg-Schultz, 1999.

Una de las características a destacar de las termas es la aparición de la relación entre forma y función, la agrupación y articulación de espacios y la utilización de la estructura en función de ello.

La realización del complejo exigió el uso de las más altas tecnologías constructivas de la época e innovaciones que agilizaran la obra. Una de sus innovaciones fue la fabricación de cimbras y encofrados para las bóvedas del edificio pues, no sólo debían cumplir un rol estructural, sino que debía servir como andamiaje para quienes debían decorar las bóvedas.

Por primera vez en Roma, encontramos la articulación transitable entre el espacio exterior y el interior; en Grecia esa articulación la constituía el espacio entre la columnata y la masa del edificio.

Sus construcciones estaban marcadas por las mismas concepciones; así como el trazado de los caminos conducían a un centro, Roma, las ciudades en sí y su arquitectura se formulaban alrededor de un centro signado por la simetría, la articulación de espacios, la ortogonalidad y el orden cósmico expresado por la geometría. Lo antedicho hubiera sido imposible sin sus avances tecnológicos.

Si bien utilizaron los órdenes de los griegos, no se detuvieron en sus elementos individualmente, consideraron un todo conformado por un sistema jerárquico, ordenado y articulado al servicio del poderío y la majestuosidad, con tecnologías desconocidas para la época.

I. 2. ENTRE LA CAÍDA DEL IMPERIO Y EL FIN DE LA EDAD MEDIA: LA ÉPOCA DE LA FE

El período comprendido entre el siglo III y el siglo V se lo suele denominar *Antigüedad Tardía* por haber sido una etapa de transición en diversos ámbitos: en lo económico, se pasa del modo de producción esclavista al modo de producción feudal; en lo social, desaparece el concepto de ciudadanía romana y se instauran los estamentos medievales; en lo político, se asiste a la dispersión del poder, al caer la centralización que suponía la primacía del Imperio; en lo ideológico y religioso, la pluralidad de dioses clásicos cede su lugar a sociedades teocéntricas.

Se ha dado en dividir este tiempo histórico en tres etapas dadas sus características: la Temprana Edad Media, caracterizada por la unión de dos culturas distintas, la latina y la germánica; la Alta y la Baja Edad Media, momento en el que se desarrollaron, de la mano de la burguesía, las bases para el sistema capitalista que surgiría con posterioridad.

EL COMIENZO: ARQUITECTURA PALEOCRISTIANA Y BIZANTINA

Al trasladar Constantino en el año 330, la capital del Imperio a Constantinopla marcó el comienzo de una nueva Era. El orden establecido por los romanos es reemplazado por el orden de la fe cristiana, pasando a ser la iglesia un hito en la ciudad.

Ante la crisis de valores provocada por tal reemplazo, el ser humano paleocristiano se sentía inmerso en la inseguridad y ya no podía afincarse ni en la naturaleza, ni en la historia; sólo podía hallar la seguridad existencial en su interior en el que se encuentra Cristo y aunque tomaron de referencia construcciones romanas como la basílica o el Aula Palatina, las relaciones espaciales estuvieron marcadas por un profundo simbolismo cristiano, con elementos tales como el recorrido, simbolizando el camino hacia Cristo y la eternidad, o la inclusión de la cruz en la planta de la iglesia mediante el crucero.

En la construcción de sus iglesias, expresaron la interioridad y la espiritualidad que abarcó el todo mediante un interior profusamente decorado de manera continua, donde se pierde la noción de lo estructural y nada parece terrenal; el interior envuelto en gruesos y despojados muros que lo encierran.

A mediados del siglo IV surge una nueva construcción arquitectónica, el monasterio, representante del espíritu de la vida cristiana. Un grupo de construcciones destinada a

albergar y satisfacer las necesidades de una congregación, formaban generalmente un recinto cuyo centro lo constituía la iglesia. Estos monasterios significaron un sostén económico de la población con base en el trabajo.

El monasterio presentaba una serie de edificios a efectos de satisfacer las necesidades de la comunidad que lo habitaba bajo un estricto orden cristiano. Por lo general, la iglesia, era el centro del recinto formado por las edificaciones.

En el siglo VI, bajo el dominio de Justiniano, Bizancio se transforma en lo que se dio en llamar, la ciudad de las cúpulas, sobresaliendo Santa Sofía. Considerada uno de los grandes logros de este período, con una planta cuadrada y un baldaquino central, logra trazar un eje longitudinal, gracias al manejo de las semicúpulas laterales, los planos determinados por columnas y el ábside.

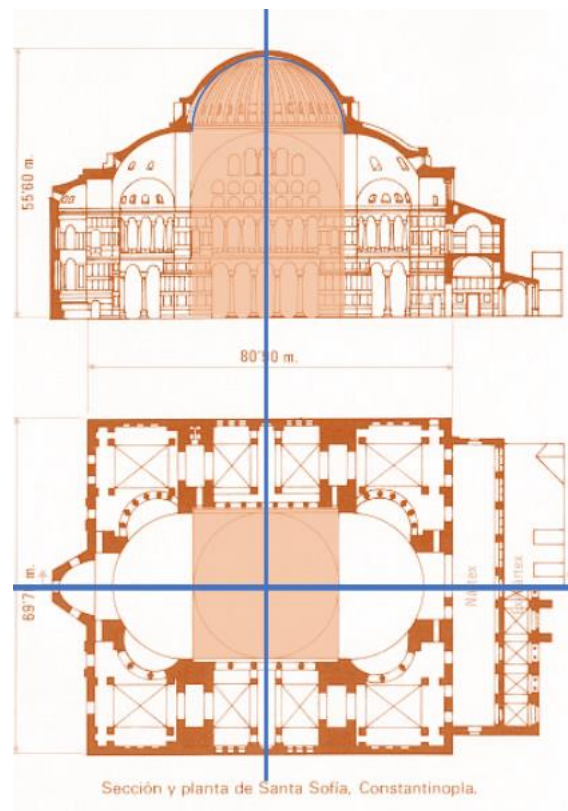


Fig. 7: Sección y planta de Santa Sofía.
Fuente: Intervención propia sobre gráfico de arq.com.mx

Si bien las cúpulas ya se habían utilizado en la antigüedad, la novedad que presentan las cúpulas de Justiniano, radica en que son tratadas como baldaquinos, logrando la transición de un cúpula circular a un planta cuadrada mediante pechinas, lo que permitió perforarlas obteniendo el paso de la luz.

Tanto las iglesias justinianas como las paleocristianas, parten del mismo principio de espiritualidad e interioridad donde la arquitectura surge del interior al exterior, la diferencia radica en la valorización del eje vertical de la iglesia bizantina que une el cielo con la tierra y la del eje horizontal de la iglesia paleocristiana, indicando el camino al interior del ser humano representado por el altar.

En la iglesia paleocristiana, el muro encierra el espacio que se encuentra cubierto con un techo a dos aguas a diferencia de las cúpulas bizantinas.

La primera iglesia paleocristiana, construida luego del decreto de 313, en favor de la cristiandad, fue San Juan de Letrán. La innovación que propone esta construcción, en correspondencia con el espíritu cristiano, es que constaba de un espacio compuesto por una nave central y dos laterales a cada lado, utilizadas por el pueblo y un presbiterio para el clero. Es decir, en un mismo espacio se encontraban los sacerdotes y el pueblo, en los templos griegos y romanos, a la cela sólo tenían acceso los sacerdotes.

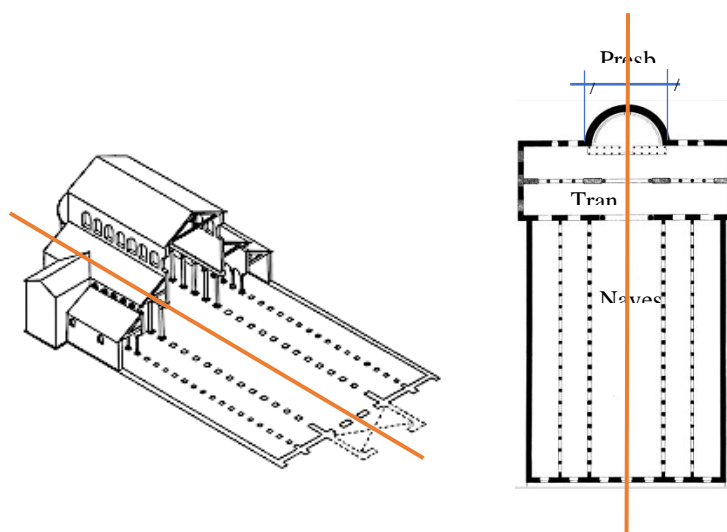


Fig. 8: San Juan de Letrán, Roma. Eje de simetría y tránsito hacia el altar

Fuente: Elaboración propia sobre restitución hipotética de su estado hacia el 320 de Vidal Álvarez, “El primer arte cristiano” (siglos III-V) p. 35

En el paleocristiano no se encuentran grandes avances tecnológicos o propuesta arquitectónicas desafiantes, simplemente los esfuerzos estuvieron volcados hacia la interioridad y así lo expresaron con su arquitectura, que habiendo tomado elementos de los romanos, los resignificaron y, a diferencia de ellos, que preservaban la totalidad, el adentro, el afuera y la articulación; pusieron sus energías a la configuración del espacio interior, donde el eje de simetría longitudinal, copiado de la basílica romana, ahora

adquiría la lectura del transitar al interior del ser humano. La geometría *per se* ya no constituía un elemento jerárquico del diseño, simplemente mostraba la armonía divina.

PERÍODO ROMÁNICO:

VERTICALIDAD Y HORIZONTALIDAD PARA ACERCARSE A DIOS

Luego de las invasiones islámicas, en una Europa desbastada y sin un poder centralizado, los habitantes comenzaron a buscar seguridades materiales tanto en el monasterio, como en el castillo feudal.

Habiendo surgido el monasterio en los comienzos de la salida a la luz del cristianismo, éstos fueron tomando impulso llegando a constituir una red comunicada por caminos en toda Europa; no sólo se erigieron como centros económicos de producción y culturales, sino que además, acogían a los peregrinos en su andar hacia los santuarios o persiguiendo reliquias de santos o de Cristo.

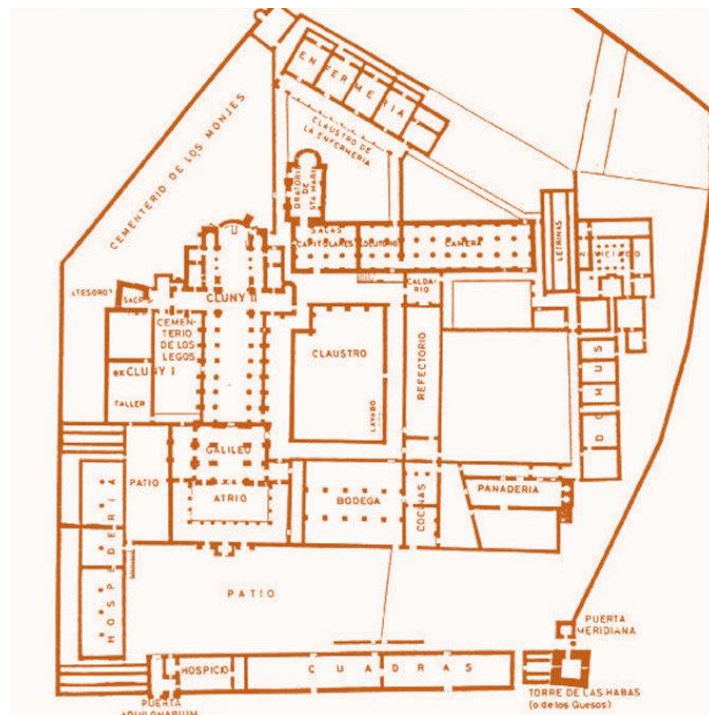


Fig. 9: Monasterio de Cluny

Fuente: https://issuu.com/lilaguerra15/docs/portafolio_arquitectonico/s/11396954

Un ejemplo de los santuarios mencionados se encuentra en el de Santiago de Compostela, levantado en honor al patrono protector de la ciudad.

Hasta él llegaban cinco caminos que sirvieron de verdaderas vías de comunicación entre los monasterios y las comunidades; siendo ampliamente transitados, adquirieron suma

importancia para la ciudad, al punto que Peter Eisenman, en pleno siglo XXI, los refiriera en lo inmanente de su Casa de la Cultura de Santiago de Compostela, superponiéndolos a una trama cartesiana.

La característica arquitectónica del románico, que presentan tanto los monasterios, incluidas las iglesias que albergaban como los castillos, es la presencia de una fuerte verticalidad inferida por las torres. En las iglesias esta verticalidad convive con una longitudinalidad interior, presentando al exterior un importante recinto macizo.

El origen de las torres lo podemos rastrear en los elementos de refuerzo de las murallas romanas. En esa época adquirieron un significado simbólico. El conjunto formado por la puerta y sus dos torres laterales, simbolizaron el ingreso a un espacio donde residía el poder político: el castillo y el poder divino, la iglesia.

Cuando en la basílica longitudinal aparece una fachada con torres, es cuando se manifiesta la iglesia prerrománica y románica; a la basílica paleocristiana se le suman las torres, símbolo de la protección divina.

La iglesia de Santiago de Compostela presenta una planta establecida en cruz latina con deambulatorio, características, éstas, de las iglesias de peregrinaje. Una fuerte direccionalidad hacia el altar, donde la presencia de los ábsides y las naves laterales, refuerzan la sensación de direccionalidad y extensión del espacio.

En general puede decirse que las plantas de las iglesias de peregrinaje simbolizan una extensión horizontal que no se encuentra en las precedentes iglesias medievales. Podría pensarse que este carácter deriva de la función de estas iglesias, meta de peregrinos procedentes de todas partes de mundo. (Norberg-Schultz, 1999, pp. 85-86).

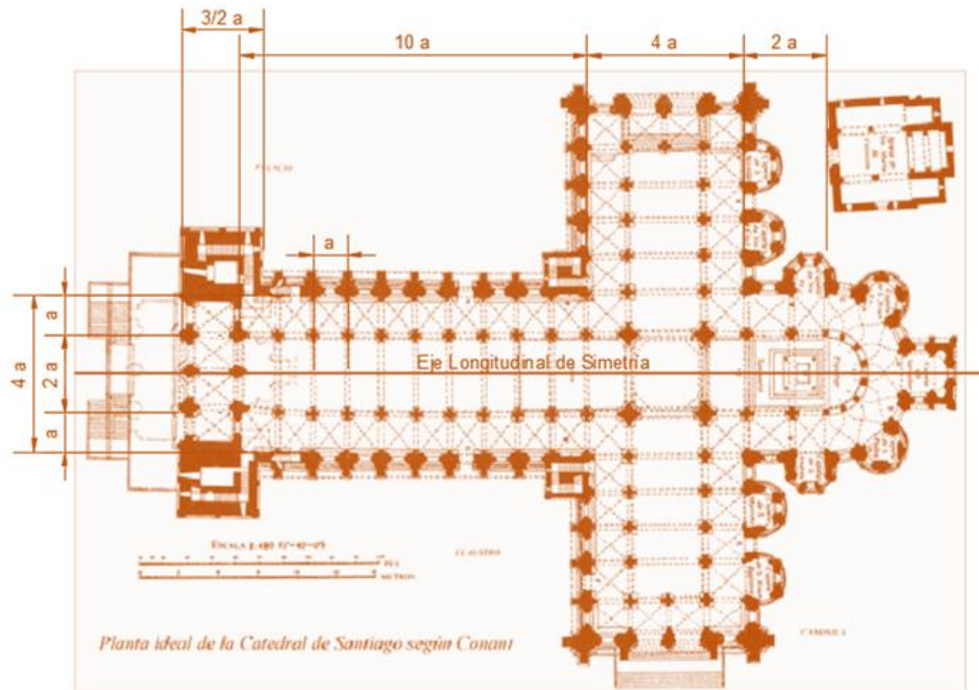


Fig 10: Sistema de proporciones determinante en el manejo de la estructura y configuración de la planta.
Fuente: Elaboración propia.

Esta horizontalidad de la planta convive con la verticalidad, no sólo en el exterior, también lo hace en el interior. Hacia el exterior se presenta en los tres imponentes accesos flanqueado por las torres, uno de ellos hacia la nave central y los otros dos permiten el acceso desde el transepto. En el interior, la sucesión de arcadas, la mayor altura del crucero, permitiendo el acceso de luz y la bóveda de cañón que comienza directamente sobre los arcos, acentúan la verticalidad.



Fig. 11: Exterior: Verticalidad presente en las torres.
Fuente: Norberg Schultz Christian. (1999) *Arquitectura occidental*.

Una pesada masa de mampostería ya no aísla el interior de la iglesia del exterior; la fachada comienza a abrirse al mundo, al mismo tiempo que se acentúa el recorrido del espacio interior, el camino hacia Dios ya no simplemente al interior del ser humano.

A efectos de lograr tanto la desmaterialización de la fachada, conservando su solidez, como acentuar el recorrido en la espacialidad interior, se reemplaza los muros paleocristianos por una estructura de elementos identificables.

En distintos lugares de Europa encontramos iglesias con características propias, por ejemplo, a diferencia las iglesias de peregrinaje que se basan en la planta de cruz latina y ábside, las abadías enfatizan el eje longitudinal; en Italia la iglesia fue concebida como el núcleo de un conjunto urbano, anticipándose a la catedral gótica.

Pero a pesar de las peculiaridades, en todas ellas encontramos elementos comunes como la convivencia de verticalidad y horizontalidad, la articulación de los distintos espacios, la permeabilidad al exterior mediante la mayor transparencia de la fachada y la apertura hacia lo alto en el crucero, símbolo de la protección divina.

Este es el principio para llegar a considerar a la iglesia abierta a la comunidad, como la casa de Dios.

ARQUITECTURA GÓTICA: ÚLTIMA ETAPA DEL TEOCENTRISMO

A partir de 1200 d. C., la sociedad europea sufrió grandes cambios. Empezaron a surgir las universidades: centros públicos donde la sociedad podía ir a estudiar, a ser enseñada por otra persona más sabia, a culturizarse. Se creó así la figura del *profesor*: normalmente aquella persona que poseía una copia original de un libro antiguo y quien se encargaba de descifrar a sus alumnos el contenido.

Los estudiosos europeos del siglo XII recuperan a través de los árabes -asentados en España- textos de valor científico, tales como los “Elementos de Euclides”, escrito en el siglo III a. d. C donde sistematizó la geometría existente hasta ese siglo, dando lugar a la geometría euclidiana, en la que se basa la teoría newtoniana; ambas lógicas se establecerían en la arquitectura. La geometría euclidiana por más de dos mil años, y la lógica newtoniana a partir del siglo XVII, aunque con anterioridad también, la función de las estructuras era conducir las fuerzas verticales a tierra.

Leonardo Fibonacci, considerado el más destacado de los matemáticos de esta época, se relacionó con los árabes mediante el comercio y aprendió conceptos matemáticos vedados hasta el momento a la sociedad occidental; es así como, en 1202, publica lo aprendido dando a conocer la notación decimal utilizada por los árabes y el dígito de valor nulo. Si bien este sería un concepto que en muchos aspectos revolucionaría al mundo, específicamente en el área de la arquitectura y el arte, plantea la sucesión de Fibonacci, relacionada con la proporción armónica y el número de oro, enunciados por Euclides en sus “Elementos”.

El uso de esta proporción explotará en el Renacimiento y se la utilizará a lo largo de la historia como símbolo de los elementos más valorizados de una sociedad, por ejemplo, en el diseño del logo de Apple

Sucesión de Fibonacci: $1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 \dots (n-1) + n$

El rectángulo áureo es aquel cuyos lados cumplen con la proporción armónica.

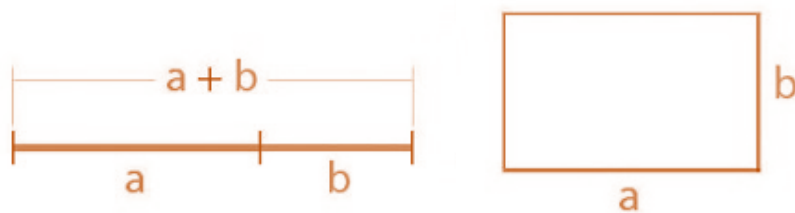


Fig.12: Rectángulo áureo cuyos lados cumplen con la proporción armónica.
Fuente: Elaboración propia.

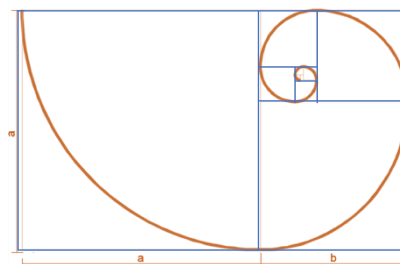


Fig. 13: La espiral áurea inscrita en un rectángulo áureo utilizando la sucesión de Fibonacci.
Fuente: Elaboración propia

La espiral áurea es la espiral que puede inscribirse en un rectángulo áureo. Fibonacci mediante cuadrados cuya medida de sus lados siguen a su sucesión, consigue trazarla y se la vinculó por siglos con la naturaleza y el crecimiento. Lo que ocurre es que la espiral áurea se acerca en gran medida a una espiral logarítmica asociada al crecimiento de los seres vivos. Pero los logaritmos fueron creados en 1614 por Napier.

La sección áurea en la arquitectura:



Fig. 14: Comprobación de la sección áurea en el diseño de la fachada de Santo María Novela. Fuente: Elaboración propia utilizando GeoGebra

La sección áurea como elemento de prestigio del diseño:

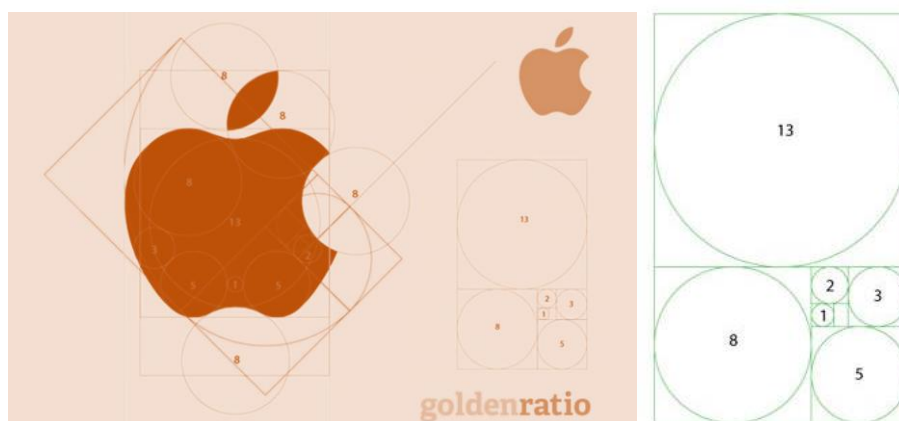


Fig. 15: Base geométrica del logo de Apple.
Fuente: <https://appleencia.com/2013/05/proporcion-aurea-logo-apple>

Arquitectónicamente, en la baja Edad Media, entre finales del siglo XII y el siglo XV, surge en Europa occidental lo que se dio en llamar “arquitectura gótica”. Esta época será testigo de un gran avance tecnológico de incidencia en la configuración espacial.

Referir a la arquitectura gótica impone contextualizarla. A partir del siglo XI, un marcado crecimiento demográfico, dio lugar a numerosos asentamientos en toda Europa y la transformación de aldeas en ciudades.

La urbe de este período presenta un recinto amurallado con multiplicidad de actividades, cuyo centro lo ocupa la iglesia y al que llegan variados caminos que la vinculan con otros asentamientos y ciudades, interrelacionándolos y permitiendo, entre otras cosas, el intercambio cultural y comercial.

Se podría llegar a establecer una analogía entre la muralla protectora de la ciudad aislada de comienzos de la Edad Media con el pesado muro que rodea la iglesia paleocristiana; la iglesia románica, aunque más permeable, en su relación con el exterior, conservará su imagen de fortaleza.

Al igual de lo que ocurre con el asentamiento urbano, la catedral gótica establecerá una nueva relación: se tornará transparente e interrelacionará con la comunidad, mientras que, debido a esa misma transparencia, se inundará de luz natural, instaurando la noción de la presencia divina.

La arquitectura gótica no significó una ruptura con la arquitectura que se venía desarrollando desde el siglo IV; va a acentuar la longitudinalidad, la centralidad y la verticalidad del románico, esta verticalidad la llevará a todo el edificio en vez de localizarla en las torres.

Siendo el centro de la urbe, en función de su vinculación con el asentamiento, el exterior de la catedral gótica se transformó, en sus bajorrelieves no sólo daban a conocer los evangelios, sino que, además, instruían sobre la vida cotidiana como pueden ser las épocas de siembra. En realidad, lo que deseaba transmitir, tanto en su exterior como en su interior, era el perfecto orden de la cosmovisión cristiana en todos los ámbitos de la vida.

La geometría brindaría los elementos de orden y perfección que yacen en dios. Los polígonos regulares son representativos de ello, simbolizando el círculo la perfección y el triángulo, la santísima trinidad. Partiendo de una unidad, variable en cada comunidad -ya que no existía el sistema de medición global-, mediante proporciones se establecía la composición geométrica de la obra que marcaba la estructura.

En las catedrales góticas, tanto los ejes compositivos, como las proporciones de su disposición en planta y alzada seguían reglas muy definidas, resultado del simbolismo a las que debían corresponder. Según San Agustín, la perfecta razón era 1:2; en base a ella se trazaría la planta y la alzada, es así que el ancho de la nave lateral es la mitad del ancho de la nave central.

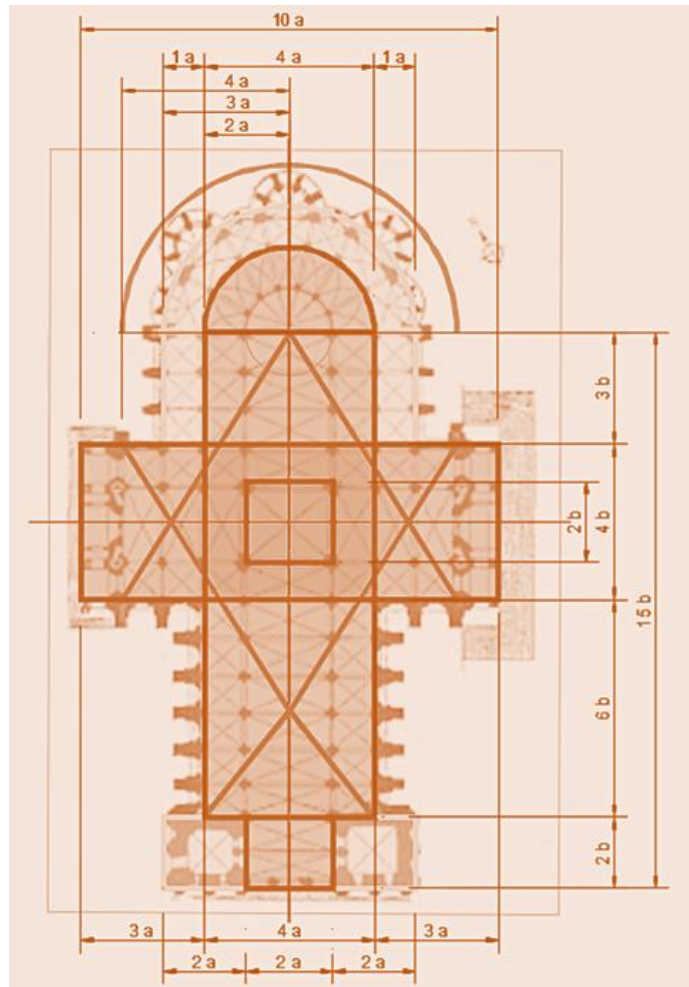


Fig. 16. Configuración geométrica de la planta en correspondencia de las proporciones que la determinan.
Fuente: Elaboración propia

Existen diversas teorías referidas a la aplicación de las proporciones de la Catedral gótica, basada en hechos reales. Una de ellas vincula las notas musicales con las proporciones utilizadas en el diseño de la fachada de la catedral de Chartres, basándose en conceptos de pensadores de la época.

Los pensadores chartrianos del siglo XII, cultivaron los principios cosmológicos del *Timeo* de Platón, conocido a través de la traducción y de los *Comentarios* de Calcidio. Los chartrianos asumieron las concepciones estéticas provenientes del *pitagorismo* y del

neoplatonismo, por lo cual, al igual que los griegos, sus pensadores sostenían que la música ordenaba al universo; es decir, el orden del universo obedecía a la *harmonía* impuesta por el Creador a todas las cosas. “*El orden establecido por la armonía es la imprimación de las ideas divinas en la materia informe*” (De Conches, 2015 Libro I, 5). Por lo tanto, las proporciones matemáticas regirían el trazado de la catedral gótica.

Es por esta razón, que el historiador del arte von Simson (1956) propuso la posibilidad de una “*geometría chartriana basada en las proporciones musicales*”, hipótesis discutida por Wittkower (1995) por no haberse presentado, hasta el momento de su afirmación, estudios geométricos de la catedral de Chartres que permitan concluir, de manera contundente, que su arquitectura se basa en las proporciones de la escala diatónica.

En el año 2005, Tomasini presenta un trabajo de investigación desarrollado *con mediciones realizadas sobre diagramas a escala y sobre fotografías frontales de la catedral, provenientes de libros especializados en el tema*. En ellas, las mediciones efectuadas arrojaron únicamente resultados aproximados, con un error inferior a 0,05. Esto significa que la diferencia entre el cálculo teórico de las proporciones musicales y la medición realizada sobre diagrama o fotografía es inferior a 0,05.

El trabajo concluye afirmando que “el estudio del trazado geométrico de la planta y de la fachada occidental de la catedral permitiría suponer que la cosmología musical del Timeo habría sido la fuente de inspiración de la arquitectura de la iglesia”. (Tomasini, 2005, s/p).

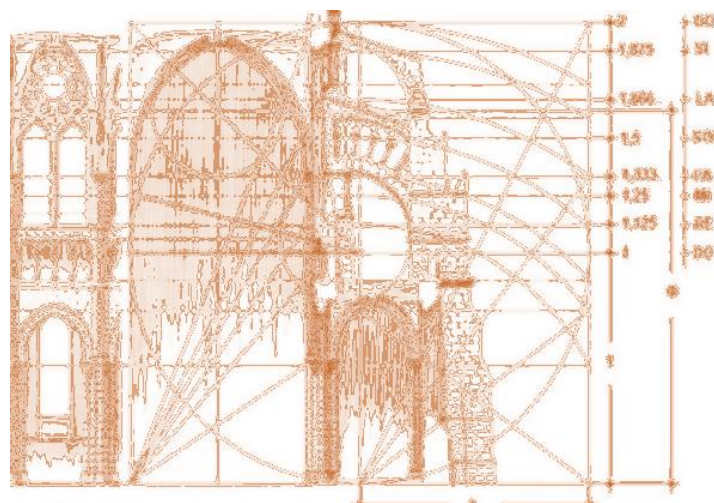


Fig. 17: Gráfico realizado por Tomasini, en el marco de su investigación: Trazado de la fachada de la Catedral de Chartres de acuerdo con los principios de proporción y belleza. La armonía de la música en la arquitectura.

Fuente: <https://www.scribd.com/document/363262822/Tomasini-Maria-Cecilia-pdf>

Si bien Tomasini formula la conclusión en potencial, aunque señala resultados por los cuales realiza tal afirmación, la importancia del estudio radica en plantear la búsqueda de dios a través de la armonía musical de Pitágoras, pero esta vez en la historia, significará la búsqueda de dios en las proporciones geométricas y el número.

La presencia de números irracionales, símbolo, en primera instancia, de lo inconmensurable del universo, para la Edad Media simbolizaría lo inconmensurable de la divinidad y estará presente en la configuración espacial de la catedral gótica, lo que incluye su estructura. Para la aplicación de estos números en la catedral, partiendo de la unidad de medida, privativa de cada comunidad, se trazaba la vesica piscis, obteniendo la irracional raíz cuadrada de tres y los ángulos de 60° , 45° y 30° ; los demás irracionales se obtenían partiendo de la diagonal de cuadrado de lado igual a la unidad.

En base a un gráfico de Johan Van Tonder de 1984 se ha verificado, analíticamente, las proporciones por él planteadas en la alzada de la Catedral de Chartres en elevación, partiendo del número de la vesica piscis, y la razón 1:2.

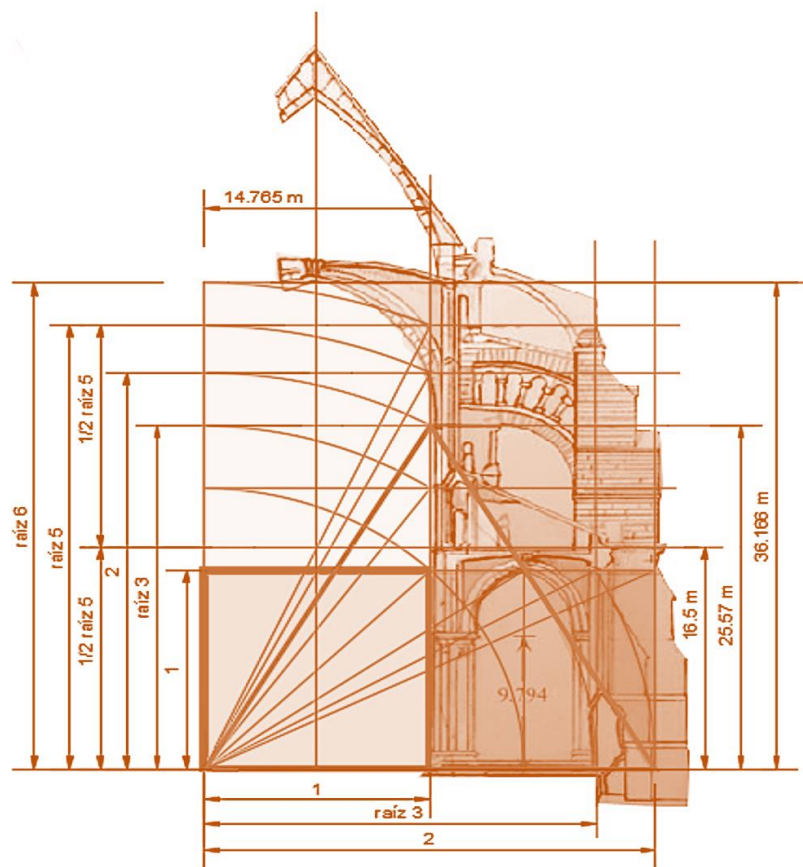


Fig. 18: Comprobación geométrica mediante CAD de las proporciones y aplicación de irracionales en la alzada de la Catedral de Chartres, partiendo del ancho de la nave central como unidad de medida.
Fuente: Elaboración propia

Comprobación analítica:

Comprobación analítica. Tomando como unidad el ancho de la nave central se tiene que:

$$14,765\text{m} = 1\text{u luego}$$

$$\frac{\sqrt{5}}{2} \cdot 14,765 = 16,5\text{m}$$

Correspondiente al alto del arco de la nave lateral

Del mismo modo se puede obtener:

$$\sqrt{3} \cdot 14,764 = 27,57$$

Correspondiente a la altura del arco del arbotante

$$\sqrt{6} \cdot 14,764 = 36,166$$

Altura del arco de la nave central

Al dividir el alto del arco de la nave lateral, 16,5m por el ancho de la nave central igual a 9,794m se obtiene el número de oro

La estructura de la arquitectura gótica se caracteriza por la utilización que hace del arco apuntado u ojival y la bóveda de crucería, juntamente con la intencionalidad que subyace en estos elementos estructurales.

Al adoptar el arco apuntado, en lugar del de medio punto, se logra disminuir las cargas laterales debido a la verticalidad, logrando mayor altura y cubrimiento de luces mayores.

La estructura gótica conforma un esqueleto de bóvedas de crucería, formadas por arcos apuntados, con el fin de aligerar las cargas; técnica que no se había presentado con anterioridad y destaca el conocimiento tecnológico de la época. Los empujes y el peso de la cubierta ya no son soportados por gruesos muros como en el románico, sino por pilares.

El arco circular presenta dos inconvenientes: al trabajar a compresión se autosostiene en conjunto, pero cuando está en construcción no lo hacen sus partes, lo que implica la construcción de grandes encofrados; al mismo tiempo, la altura del arco depende del diámetro del mismo restringiendo el diseño.

El arco ojival, formado por dos secciones de círculos con distintos centros, responde mejor al camino de las fuerzas y su altura ya no dependerá del radio, al mismo tiempo que se logra mayor estabilidad.

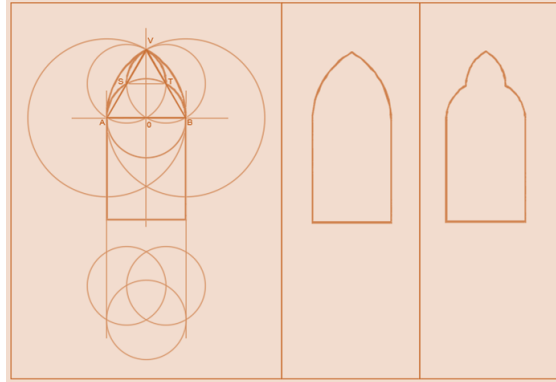


Fig. 19: Trazado del ángulo ojival y el trilobulado partiendo de la vesica piscis.
Fuente: Elaboración propia utilizando CAD



Fig. 20: Arcos angrelados o trilobulados, claustro de la catedral de Canterbury, Inglaterra © Mattana.
Fuente: <https://comentarioshistoriadelarte.wordpress.com/2014/10/31/elementos-estructurales-de-la-arquitectura-el-arco/>

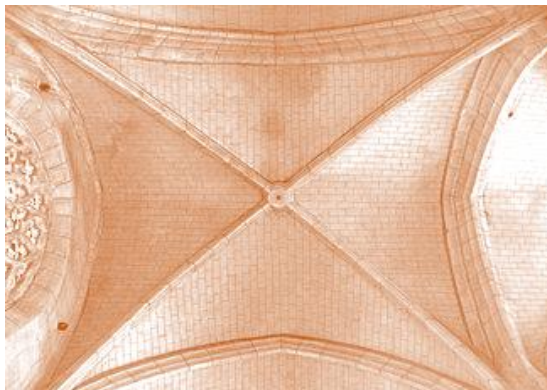


Fig. 21: Bóveda Cuatrimpartita - Iglesia de San Pedro y San Pablo



Fig. 22: Bóveda de Estrella - Catedral de Sevilla

Fuentes:

<http://composición.aq.upm.es>; <https://www.catedraldesevilla.es/visita-cultural/galeria-multimedia/>

El arco apuntado genera empujes de tendencia más verticales que el arco de medio punto, por lo que podía reducirse el espesor de muros y contrafuertes para contrarrestar los empujes. La bóveda de crucería, al aplicar el principio de arco apuntado a la sustentación de la cubierta, posibilitó que los empujes se concentraran en cuatro puntos, con lo que ya no se necesitaba todo el muro para sustentar una bóveda. El arbotante permitió una mayor altura de la nave central, respecto de las laterales.

Otra de las evoluciones del románico al gótico, la constituye el pasaje de los contrafuertes a los arbotantes, completando un conjunto estructural que permitió esbeltez y luminosidad.

Al despegar los contrafuertes de la pared y conectarlos a la estructura principal por medio de arbotantes, además de conseguir ventajas estructurales, se liberaba espacio para situar naves laterales. Esta reducción de la estructura a un simple esqueleto permitió el uso de la luz en la configuración espacial del gótico.

Los romanos utilizaron la luz como una variable más de configuración espacial en el Panteón. Estas catedrales hicieron gala de ello creando una sensación de misticismo mediante la utilización de la luz en la configuración espacial.



Fig. 23: Catedral de Chartres: Exterior, esqueleto estructural. Permeabilidad

Fuente: <https://www.arkiplus.com/catedral-de-chartres/>

Fig. 24: Catedral de Chartres: Interior. Esqueleto estructural y luz. Configuración espacial.

Fuente: <https://www.turismodeobservacion.com/foto/interior-de-la-catedral-nuestra-senora-de-chartres/49788/>

Se han analizado tres períodos que abarcan desde el siglo IV al siglo XV, pero no pueden considerarse en forma aislada, sino más bien como una unidad que evoluciona desde la caída del imperio romano de occidente y la aceptación del cristianismo, hasta la

decadencia del poder feudal y religioso con el posicionamiento de la burguesía con las implicancias económicas y sociales que ello conlleva.

A lo largo de los tres períodos analizados, se puede leer una cosmovisión cristiana que va cambiando según las condiciones del entorno y la repercusión de ello en el ser humano, en una retroalimentación constante sin abandonar la fe cristiana.

En el primer período, un ser humano desolado tomará de los romanos los elementos en los que se reconozca, resignificándolos según su fe. La planta será reformulada, en búsqueda de un eje que marque una direccionalidad; es el recorrido del ser humano a su interior; la simetría y las proporciones de la antigüedad clásica, ahora son muestra el orden divino.

A diferencia de los romanos para los cuales las propiedades geométricas, proporciones y simetrías se imponían a la totalidad de la obra; en el paleocristiano, las proporciones ordenarán un interior envuelto en gruesos muros protectores y por primera vez en la historia, el pueblo compartirá el espacio con los sacerdotes.

En el período románico, la Iglesia mediante la profusión de monasterios brindó a Europa una identidad que había perdido con la caída del Imperio, el cristianismo. Esta identidad ofreció al ser humano nuevas seguridades para lo cual manifestaría en la iglesia mediante la apertura de la muralla, que todavía conservó su aspecto de fortaleza, cuyas puertas de entrada flaqueadas por altas torres podría llegar a interpretarse como la entrada al cielo.

En la catedral gótica, con el crecimiento de los centros urbanos, la iglesia se transformó en centro de la ciudad y estableció nuevos vínculos con ella. El camino al altar ya no era como en el paleocristiano, el camino de cada ser humano a su interior, sino el camino hacia dios, marcado por la perfecta armonía divina de las proporciones.

Parafraseando a Norberg-Schultz (1999), la catedral gótica ya no reservaría la verticalidad a la torre, toda ella se elevaría a dios, para lo cual generó un esqueleto estructural, formulado empíricamente con base en proporciones y elementos significativos como los irracionales, símbolo de lo que no se puede medir. El esqueleto así formulado permitió la incorporación de la luz en la configuración espacial, logrando un misticismo envolvente del espacio.

I.3. SIGLO XV: GEOMETRIZACIÓN DEL ORDEN CÓSMICO Y ESPACIAL

CONTEXTUALIZACIÓN

Una serie de sucesos sociopolíticos aceleraron la decadencia del mundo medieval. Entre ellos, la actitud de la burguesía que, a falta de títulos nobiliarios o eclesiástico, buscará el prestigio social en el conocimiento y la cultura; serán traídos de oriente los textos de la antigüedad, al mismo tiempo que estudiosos bizantinos se refugiarán especialmente en Italia, todo ello delinearán una conciencia científicista en búsqueda de nuevos conocimientos. Estos cambios fueron acompañados por el crecimiento comercial de las naciones mediterráneas con la exploración de nuevas rutas.

La decadencia del feudalismo con el posicionamiento de la burguesía, el paulatino desprestigio de la Iglesia Católica expresada con los cismas y las sectas heréticas, serán las variables en las que se fundará el nuevo orden social, llegando posteriormente, al capitalismo.

Ya, a fines del siglo XV, se afirmó la teoría neoplatónica con su búsqueda de una condición de espiritualidad pura y absoluta la que la colocó por encima de toda experiencia de la ciencia y la historia.

En el período comprendido entre el paleocristiano y el gótico, la imagen de dios se fue acercando a la humana; este proceso sobre la imagen divina también tuvo su expresión en la configuración espacial de las iglesias.

En cambio, para la cultura del siglo XV, la perfección divina se halla en la naturaleza y en el acercarse a ella, ya sea por el arte o la ciencia. La belleza natural expresaba la perfección divina, siendo ella y la armonía valores absolutos. Al igual que la cultura gótica, pensaba un cosmos ordenado, pero a diferencia de éste, el cosmos se hallaba numéricamente ordenado y la arquitectura, matemáticamente, expresaba el orden cósmico.

La Arquitectura vuelve a las órdenes clásicas con elementos antropomorfos regidos por la proporcionalidad que, junto a otras relaciones matemáticas, como la simetría, determinan la belleza; se desarrolla la geometrización rigurosa del universo, siendo el ser humano el centro de la naturaleza.

Las proporciones geométricas abarcan el todo, el ser humano sería el mayor exponente de la divinidad, al punto que Francesco di Giorgio (1439 – 1502) traza la planta de la iglesia ideal acorde con las proporciones humanas porque ello proviene de dios.

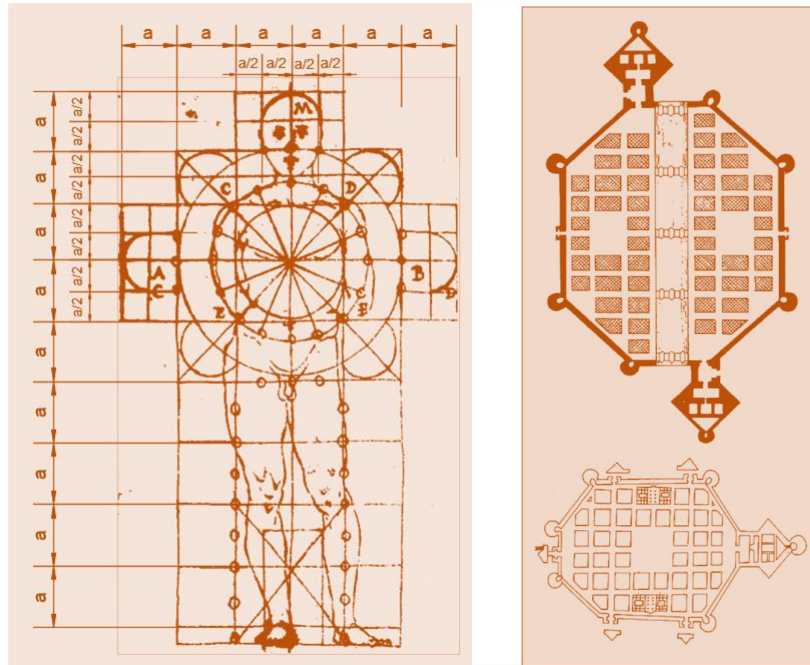


Fig. 25: Francesco di Giorgio. Trazado en planta de la iglesia según las proporciones humanas y trazado de la ciudad ideal.

Fuente: <https://www.aparences.net/es/escuelas/la-pintura-sienesa/francesco-di-giorgio-martini/>

Por primera vez, en el siglo XV, aparece el concepto de resistencia estructural asociado a la forma compositiva con Francesco di Giorgio que, basado en proporciones y formas regulares de la geometría euclidiana, realizó el trazado de sus fortificaciones, concepto que llevó al momento de diseñar ciudades ideales.

Imbuido en esta cosmovisión, el fraile Luca Bartolomeo Pacioli (1445 - 1517), matemático y economista, escribió entre 1496 y 1498 *De Divina Proportione* [De la Divina Proporción] refiriendo tanto a la sección áurea y el número de oro, como a los polígonos y la perspectiva usada por los pintores del *Quattrocento* (*Compendio Divina Proportione*); aborda también, los sólidos platónicos y refiere al tratado de Vitruvio. Estos conceptos serán de suma importancia en el desarrollo del arte del Renacimiento, dándole valor científico y matemático a la obra.

En el Renacimiento comenzó el valor de la autoría, símbolo de la mayor individualidad; el arquitecto fue reconocido por su obra y considerado por la sociedad como un “genio”, un ser muy especial, pasando a integrar el grupo de intelectuales, junto a científicos, matemáticos, literatos y filósofos.

ESPACIO – PROPORCIONES – PERSPECTIVA

Como se acabó de expresar, el humanismo desarrollado en el siglo XV, inseparable del impulso científico, se valió de la geometría y de la matemática para definir esa belleza ideal de la forma, resultando de ello un espacio tridimensional, mensurable y abarcable en su totalidad con un punto de vista donde el centro es el ser humano.

El espacio geoméricamente diseñado y homogéneo, no sólo remiten a los romanos, sino que también muestran que mediante la matemática se llega a la perfección y la armonía en términos de lo absoluto

Para Montaner, “el espacio tradicional encuentra su máxima expresión en el Renacimiento, en el que no existe separación analítica entre los elementos del espacio y de la forma, y en el que la perspectiva cónica expresa la imagen del hombre como centro”. (2011, p. 30).

Brunelleschi (1377 – 1446) fue el primero en formular las leyes de la perspectiva cónica, sistema de representación gráfico basado en triángulos semejantes, ya estudiados por Euclides.

Para Gombrich (1989, p. 229) ni los griegos, que comprendieron el escorzo, ni los pintores helenísticos, que sobresalieron al crear la ilusión de profundidad, llegaron a conocer las leyes matemáticas por las cuales los objetos disminuyen de tamaño a medida que se alejan de nosotros.

La perspectiva permite la comprensión del espacio mediante la utilización de proporciones matemáticas y triángulos.

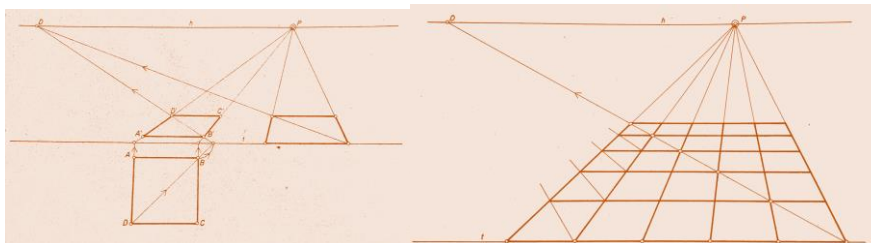


Fig. 26: Perspectiva cónica
Fuente: Perspectiva B. Raya Moral (1978). GG

Para Schultz (1999, p. 15), la primera obra de arquitectura renacentista es la Sacristía Vieja de Brunelleschi, mientras que el Templo de Bramante en San Pedro en Montorio en Roma en 1502, marcó el fin de la arquitectura del Renacimiento.

En una actitud científica de abordaje del espacio, en el Renacimiento estuvieron presentes las distintas tipologías de planta, longitudinales, centrales, en cruz griega y poligonales. En ellas se adicionaban capillas secundarias, utilizando un concepto aditivo de composición.

BRUNELLESCHI (1377 – 1446): GEOMETRÍA – PROPORCIONES - ESTRUCTURA

La obra de Brunelleschi muestra una diferencia cualitativa del Renacimiento con épocas anteriores. Norberg-Schultz coincide con Dvorak, en que “Masaccio, Donatello y Brunelleschi son los padres del estilo renacentista”. (Norberg Schultz, 1999, p. 115).

Sacristía Vieja de la Catedral de San Lorenzo (1420 – 1429)

Siendo la primera obra importante de Brunelleschi, en la Sacristía Vieja ya aparecen las características identitarias de la arquitectura renacentista: el diseño, de planta centralizada, basado en el círculo y el cuadrado, remiten al neoplatonismo instalado en el Renacimiento; el cubo y la esfera se encuentran presentes en las tres dimensiones.

La cúpula, una semiesfera simboliza al mismo tiempo, la perfección de Dios y la transición del mundo sensible al mundo inteligible (Norberg-Schultz, 1999). Otra de las características renacentista que aparece, es la introducción de elementos antropomorfos clásicos, como lo son las columnas jónicas y las pilastras corintias.

Por último, se puede mencionar, la acentuada utilización de proporciones y el espacio centralizado.

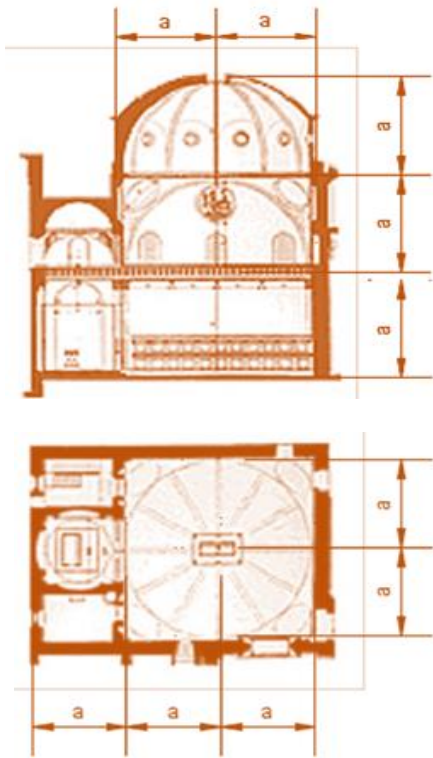


Fig. 27: Sacristía Vieja. Brunelleschi
Fuente: Intervención sobre planta y alzada

Los elementos que componen la sacristía se encuentran ordenados por una rigurosa simetría que unifica el todo e impide que falte o se agregue un elemento a la composición.

Basílica de San Lorenzo (1422 – 1446)

Si bien la centralización aparece en las primeras obras de Brunelleschi, para obras más importantes tomó como punto de partida la tipología longitudinal, con capillas laterales, como es el caso de la Basílica de San Lorenzo en Florencia.

Con planta en “T”, su configuración se basó en unidades geométricas elementales, mostrando espacialmente una totalidad modulada, el ritmo del espacio se obtiene mediante la geometría (y no por intuición). Un círculo inscrito en un cuadrado, determinan geoméricamente, el espacio de la basílica. Dicho cuadrado es tomado como módulo e igual al de la capilla mayor.

El ancho de la nave lateral es la mitad del ancho de la nave central; siendo el ancho de las capillas un cuarto del ancho de la nave central. La altura de las columnas es el doble del ancho de la nave central y en las capillas, coinciden el ancho con el alto.



Fig. 28: Interior de la Basílica de San Lorenzo. trazado perspectivo
Fuente: Elaboración propia sobre foto y planta.

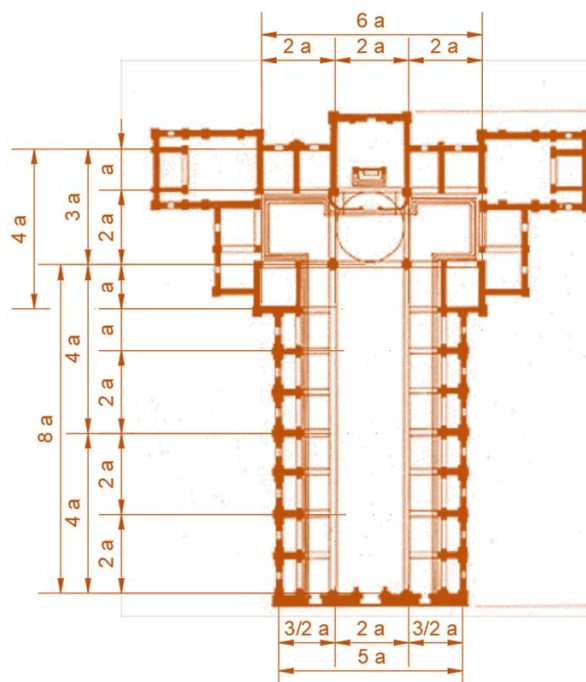


Fig. 29: Proporciones en la planta de la Basílica de San Lorenzo.
Fuente: Elaboración propia.

La altura de la nave central es el doble de su ancho, mientras que la altura y el ancho de las naves laterales coinciden. La estructura se diferencia cromáticamente de cerramientos y depende de la modulación espacial, aportando ritmo al conjunto. Los arcos de medio punto asentados en columnas corintias, son la referencia a la arquitectura romana.

Cúpula de Santa María di Fiore (1420 – 1436)

Brunelleschi, en la cúpula de Santa María de la Flor, presenta una hazaña tecnológica, que se convertirá en hito referencial de toda Florencia. Ante el problema estructural que suponía el camino de las fuerzas por las dimensiones de la cúpula, optó por la superposición de dos bóvedas octogonales, una dentro de otra, materializadas en ladrillo y divididas en tramos a modo de gajos.

Esta innovación permitió un reparto de esfuerzos, además de conseguir la sensación de ligereza, con la particularidad de que esta cúpula, por forma, anula los empujes horizontales transmitiendo al tambor que la sustenta, tan solo las cargas verticales correspondientes a su propio peso.

La cúpula de la Catedral de Florencia supuso un gran despliegue tecnológico para la época, debido a la dimensión de la superficie a cubrir y a disposición de la configuración espacial, la cual incluía el uso de la luz proveniente de sus óculos. Uno de los grandes problemas que enfrenta consiste en cómo se distribuyen las fuerzas de la mejor manera.

Una cúpula hemisférica, basada en el arco circular, en ese caso, la altura de la cúpula así definida es función de su ancho. Si bien los arquitectos islámicos recurrieron a la cúpula consiguiendo mayor altura y mejor distribución de las fuerzas; nunca se había construido una cúpula con las dimensiones que Brunelleschi proponía.

Para obtener el perfil de su cúpula, recurre al geómetra Paolo Pozzo Toscanelli, quien aplica el arco “a quinto acuto”. Esta figura geométrica se obtiene dividiendo *el diámetro en 5 partes iguales*, mientras que el radio del arco surge de la distancia entre la quinta parte al extremo.

Al superar el “quinto acuto” en altura al semicírculo, el *empuje horizontal es menos de la mitad de un arco semicircular* de igual luz, lo cual ya era conocido por los constructores del Domo de Milán.

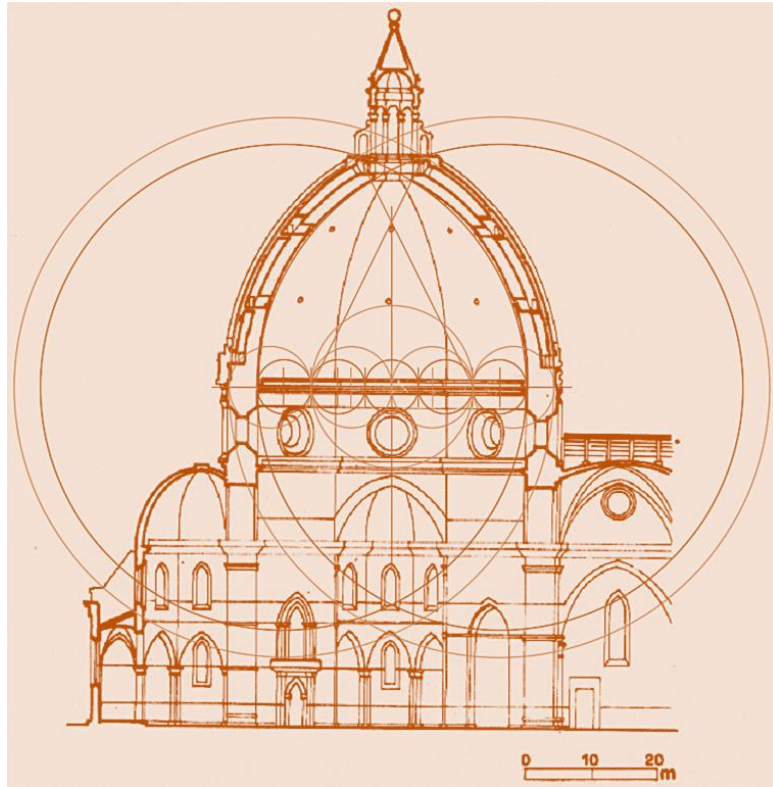


Fig. 30: Trazado geométrico de la cúpula de Santa María: “a quinto acuto” y despiece de la estructura.

Fuente: Elaboración propia utilizando CAD.

Los profundos conocimientos matemáticos y geométricos de Brunelleschi le permitieron el diseño y concreción de la cúpula. Es por ello que es considerada como la construcción más importante edificada en Europa desde la época romana, debido a la relevancia fundamental que ha desempeñado para logros futuros de la arquitectura y la ingeniería.

Iglesia del Espíritu Santo (1444 – 1446)

Esta obra de Brunelleschi, la última ya que fallece en 1446, si bien su resolución hace mención a la de la iglesia de San Lorenzo, en el Espíritu Santo logra componer toda la planta partiendo de un cuadrado, al igual que la alzada. Las naves laterales están constituidas por una sucesión de cuadrados, mientras que, tanto el presbiterio como el transepto se basan en cuatro cuadrados

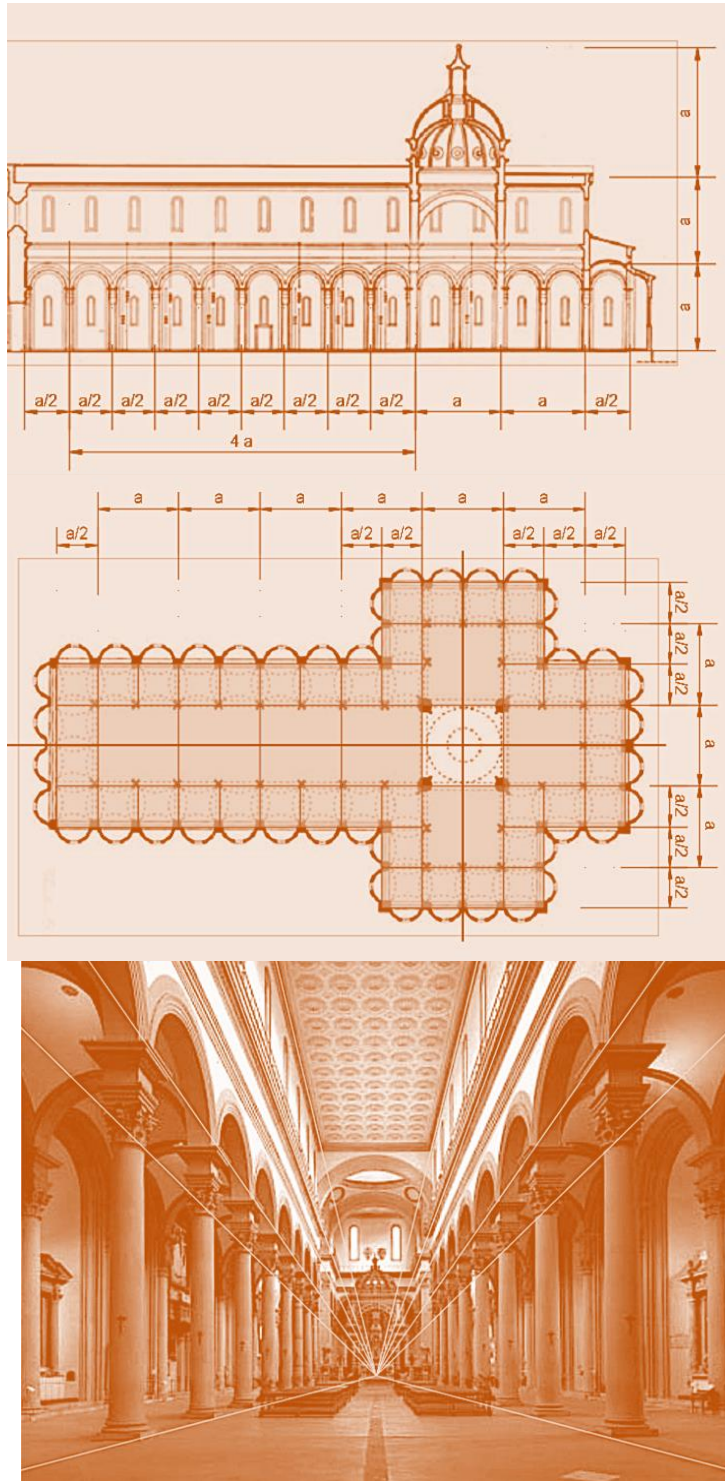


Fig. 31: Proporciones y perspectiva de la Iglesia del Santo Espíritu
Fuente: Elaboración propia sobre documentación y fotografía

Podemos concluir afirmando que en Brunelleschi la matemática estuvo presente, tanto en el lenguaje, como en la materialización de la obra arquitectónica. Un lenguaje formulado desde la matemática y la geometría le permitió, tanto la generación de una configuración espacial acorde a la cosmovisión del Renacimiento, como una estructura participante de ella y que se asienta en la ideología imperante mediante la búsqueda de nuevas tecnologías alcanzadas a través de la investigación y la ciencia.

LEÓN BATTISTA ALBERTI (1404 – 1472): TRATADOS: PROPORCIONES Y ESTRUCTURA

Con la mirada vuelta a la antigüedad clásica a través de Vitruvio (80 a. C. – 15 a. C.), y del concepto vigente de lo absoluto mediante la aplicación en el diseño de proporciones, figuras regulares inscriptas en el círculo y sólidos platónicos, Alberti trató de recuperar la noción de belleza relacionada con la proporción de la figura humana.

Las proporciones matemáticas, conmensurables, es decir, que pueden expresarse como cociente entre números enteros, e inconmensurables -representada por los números irracionales-, estarán a disposición de un espíritu ordenador del todo y de cada una de las partes dentro de la obra de arquitectura, munida de euritmia, repetición y simetría.

Afirmó que se debía asignar a los edificios y a sus partes una posición apropiada, una proporción exacta, una disposición conveniente y un orden agradable, es decir, hacerlos bellos, no dependiendo esto del material, mientras que el trazado de las iglesias debía responder a la circunferencia y la esfera por presentar la mayor de las simetrías.

Los elementos geométricos, para Alberti, simbolizaban la perfección que conllevaba al concepto de divinidad, lo que implica la totalidad.

La lógica compositiva clásica tendería a ordenar el espacio mediante elementos sujetos a una formación global ordenada, ajustada a un conjunto de figuras reconocibles e implícitamente fijas, de referencia, desde un único y privilegiado punto de vista exterior, que acabarían conjugando una forma global ajustada a tratados previos. (Gausa, 2010).

En este sentido, para Alberti, la belleza de la obra de arquitectura, dependió de las proporciones matemáticas, manteniendo un sistema uniforme en todas las partes del edificio.

En 1458 recibió el encargo para realizar la fachada de Santa María Novella, cuyas obras habían comenzado en 1279 y terminaron a mediados del siglo XIV. Alberti, luego de dos

años de estudios geométricos, resuelve la fachada, mediante una aplicación rigurosa de proporciones. Ya se comprobó en esta misma tesis el uso del rectángulo áureo en el trazado de la fachada mediante el software matemático GeoGebra y, en el siguiente gráfico, se muestra la aplicación de proporciones e irracionales en cada una de las partes.

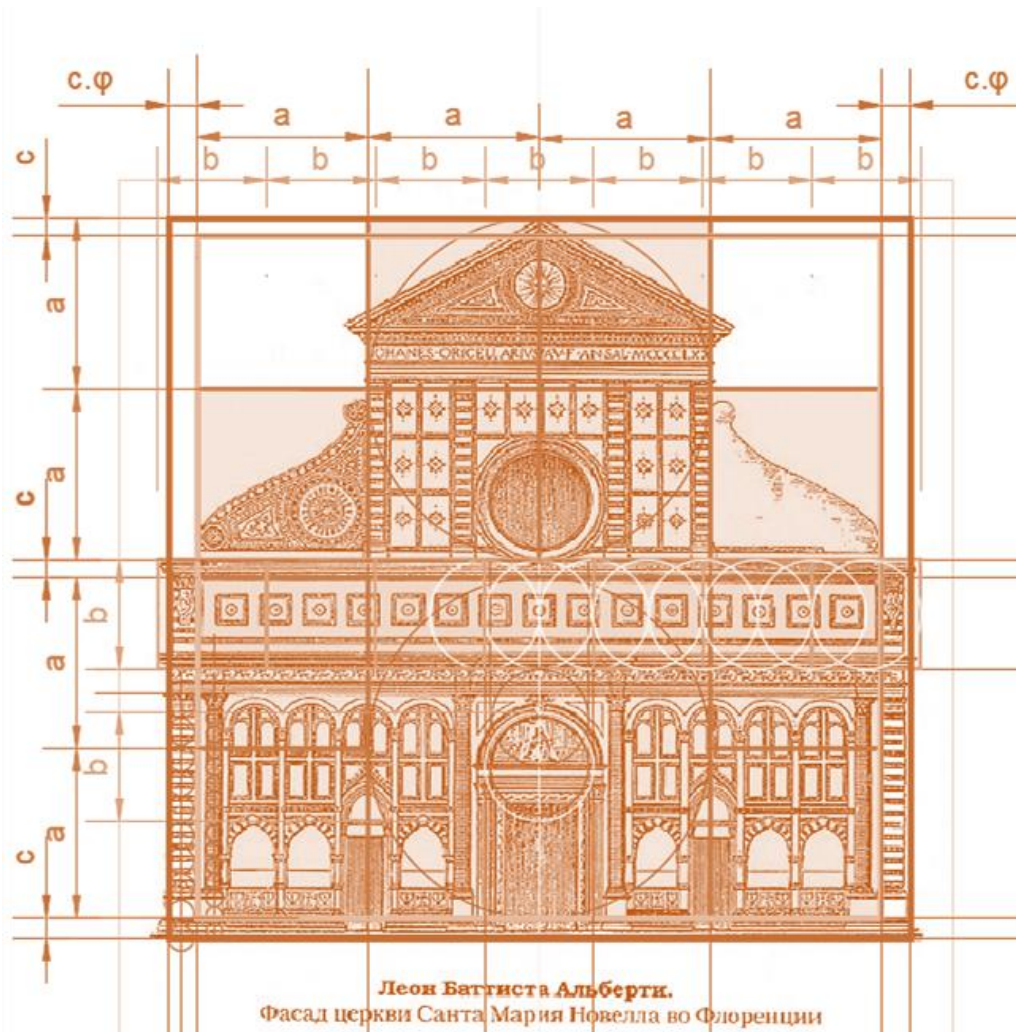


Figura 32: Proporciones de la fachada de Santa María Novela, y esquema de rectángulos áureos.
Las columnas a modo de ornamento encuadran la puerta.
Fuente: Análisis geométrico propio

Según Wittkower (1958), Alberti fijó las normas para la generaciones siguientes de arquitectos de tendencia clásica, que adoptaron sus ideas y prescripciones. Para ellos, las nuevas formas de la iglesia renacentista corporizaban un sincero sentimiento religioso. Ante esta postura esteticista, Leonardo reaccionará con rigurosas investigaciones científicas y Miguel Ángel con compromiso moral.

BRAMANTE (1445 – 1515): COMPOSICIÓN DE LA FORMA IDEAL, EL ESPACIO

Santa María Presso San Sático

Bramante, en concordancia con Leonardo, se despegó de las ideas de espacio desarrolladas hasta el momento, es decir, la geometría o la perspectiva. Para Bramante, el espacio es, al decir de Argan, la forma ideal de la naturaleza, pensada al modo de Leonardo, como un equilibrio de fuerzas en oposición. Para Leonardo, siguiendo a Argan (1965), el espacio es un vacío que habita la atmósfera y donde se producen efectos de luz y sombra.

Bramante, en Santa María Presso San Sático, no pudo desarrollar el vacío en profundidad, dadas las medidas del ábside, 97cm, por lo que creó la ilusión de profundidad y vacío utilizando la perspectiva

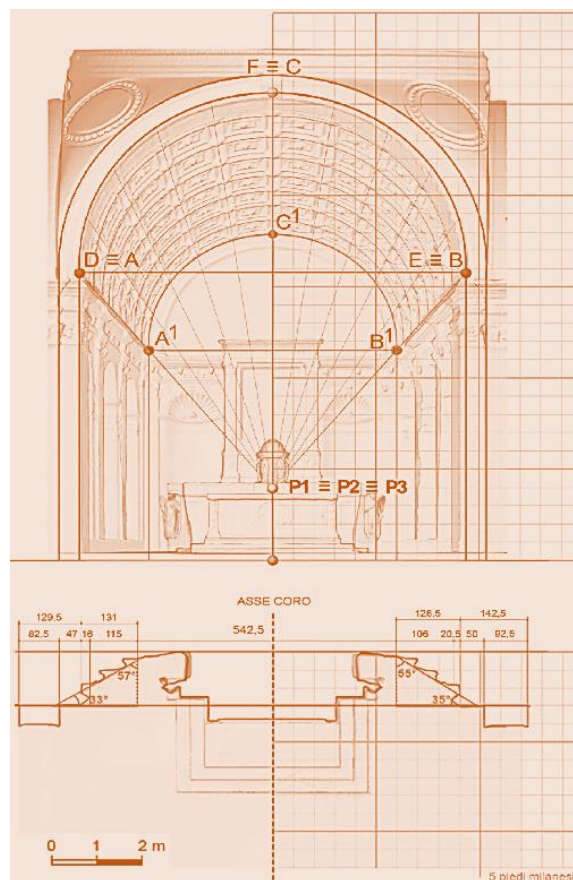


Fig.: 33: Asimetrías del coro: el ángulo en planta que compensa los diferentes anchos de los pilares mantiene el altar en el medio.

Fuente: Perspective Trials in the Manipulation of Space. The Bramante's Fake Choir of *Santa Maria presso San Satiro* in Milan.

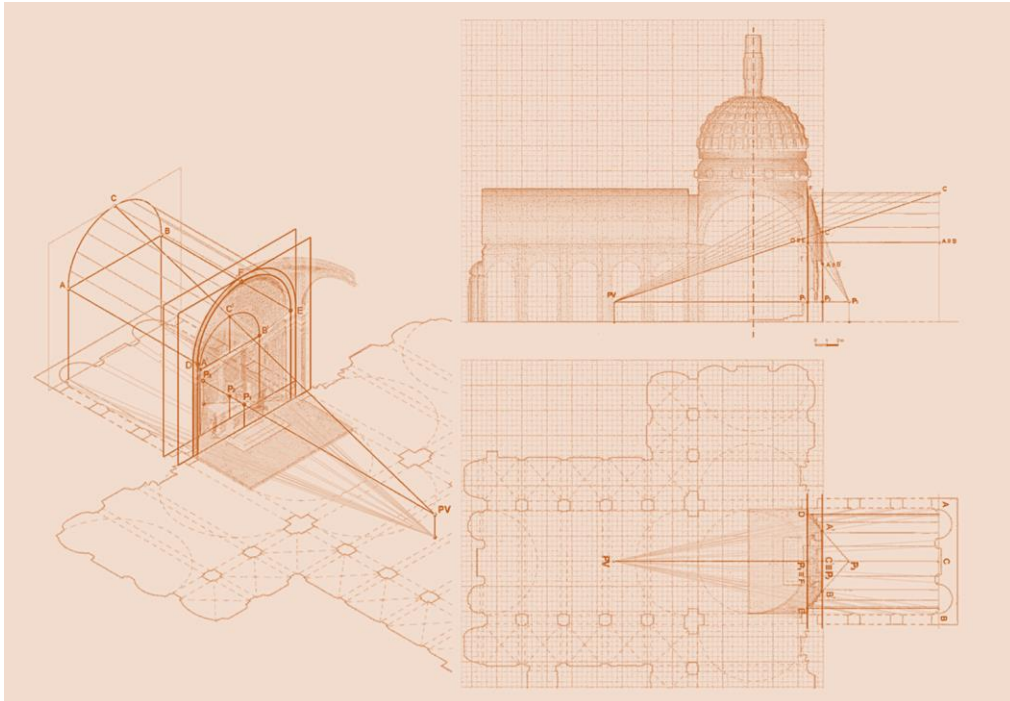


Fig. 34: Búsqueda del punto de vista en la perspectiva sólida del falso coro. Gráfico de Giorgio Buratti, Giampiero Mele, Michela Rossi.
 Fuente: *Perspective Trials in the Manipulation of Space. The Bramante's Fake Choir of Santa Maria presso San Satiro in Milan.*



Fig. 35: Santa María Presso San Sático.
<https://www.loquis.com/es/loquis/222105/Chiesa+di+Santa+Maria+presso+San+Satiro>

San Pietro in Montorio (1502): El problema de la composición

En San Pietro in Montorio, Bramante recreó un templo circular antiguo, con pequeñas dimensiones interiores donde se aloja el altar, respetando las reglas de Vitruvio y basándose en las ruinas romanas. “Indudablemente trata de fijar un modelo, un canon, un método con vistas a una empresa considerada históricamente necesaria: la reconstrucción de la histórica Roma como síntesis viva de la historia antigua y de la idea cristiana”. (Argán, 1999, p. 38).

Si bien el templete de San Pietro in Montorio tiene valor de canon de belleza arquitectónica al mejor estilo vitruviano; por primera vez, se planteó la creación arquitectónica como problema de composición.

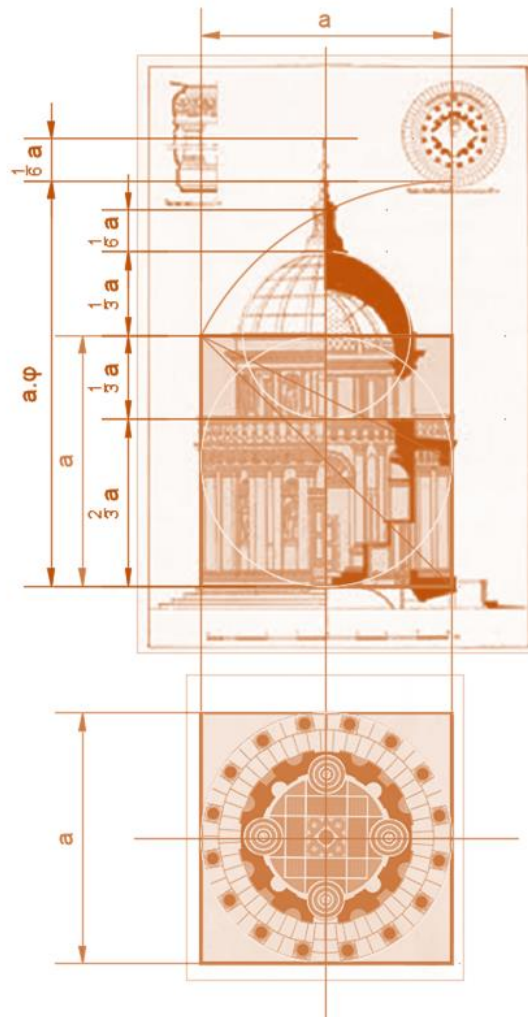


Fig. 36: San Pietro in Montorio.

Fuente: Análisis geométrico propio de la documentación de San Pietro in Montorio.



Fig. 37: San Pietro in Montorio. Bramante.

Fuente: <https://temasycomentariosartepaeg.blogspot.com/p/s-pietro-in-montorio-pietro-in-montorio.html>

La unión absoluta entre proporciones matemáticas, armonía y belleza continúan hasta el siglo XVII, pero fue Copérnico (1474 – 1543) el que marcó el inicio de un nuevo rumbo de un mundo que se aleja del “perfecto orden” del 400.

I.4. SIGLO XVI: LA DISOLUCIÓN DEL ORDEN PERFECTO

CONTEXTUALIZACIÓN.

Desde fines del siglo XV, ocurrieron grandes cambios socio-políticos que afectaron al arte y la arquitectura: en España, Francia e Inglaterra se desarrollaron importantes monarquías; un Habsburgo, Maximiliano, llega a ser emperador del Sacro Imperio Romano Germánico y Rusia encontró la unidad política. Con Francisco I y Carlos V, Europa asistió a un cambio radical: Alemania, Milán, Nápoles y Mezzogiorno, se anexan a España. A partir de 1527, Venecia se erige como centro cultural de Europa, debido a su actividad editorial.

Entre 1545 y 1563 se desarrolló el Concilio de Trento, convocado por el tribunal de la inquisición, reinstaurado en 1542. El espíritu de la Contrarreforma llevó a la fundación de la *Compañía de Jesús* que ejerció notable influencia, también en el campo artístico y la arquitectura religiosa en el afán de propagar la religión.

En esta convulsionada Europa, donde España alcanzó poderío en “el nuevo y el viejo mundo” y que, por añadidura, guardó una religiosidad cercana al medioevo, la importancia de la teoría heliocéntrica de Copérnico -independientemente de su valor científico-, se opuso a los principios escolásticos y filosóficos de la época. Las teorías de Copérnico dieron el primer paso para la secularización progresiva de las concepciones vigentes, con la consiguiente búsqueda racional de las relaciones entre universo, tierra y ser humano. Comenzó una brecha entre ciencia y magia, matemática y mística de los números, astronomía y astrología.

En 1543, en publicación póstuma, se da a conocer *De Revolutionibus Orbium Coelestium* donde se expuso el modelo matemático elaborado por Copérnico. En el siglo siguiente, Kepler aportaría a este modelo órbitas elípticas.

Se rompe el orden cósmico del Renacimiento. El mundo ordenado por una cultura humanista se derrumba, el ser humano abandonó su posición central en el universo utilizando el arte para expresar su situación existencial; será Miguel Ángel el que mejor expresó la angustia ante tal panorama.

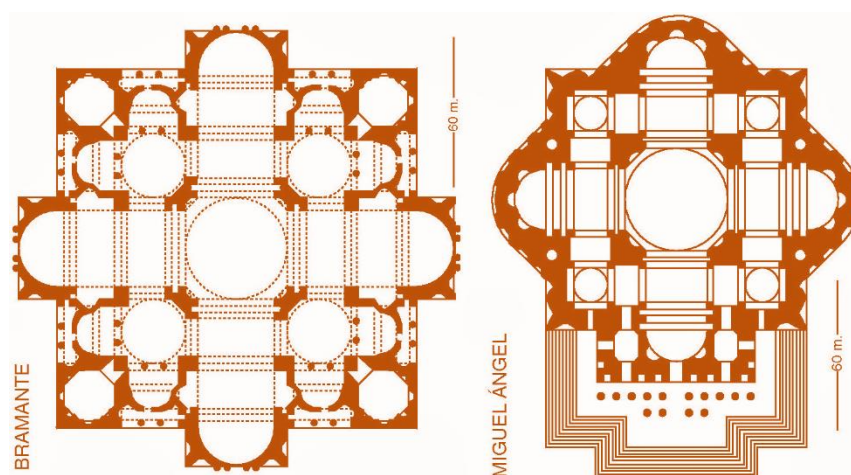
EL ESPACIO Y LA GEOMETRÍA DE LAS NUEVAS MANERAS DE LA ARQUITECTURA.

En este siglo se asistió a lo que en los textos de historia del arte se denominó “Manierismo”. Este término remite directamente a Giorgio Vasari para describir uno de los cuatro requisitos de las artes: orden, medida, diseño y *maniera*, haciendo especial referencia a las obras de Miguel Ángel. Cada artista priorizó y utilizó a su manera los órdenes clásicos; concentrándose en el contraste entre la naturaleza y lo artificial, la norma y la transgresión. La arquitectura hizo sentir la ruptura del equilibrio del *Quattrocento* en la configuración espacial y la utilización de la geometría.

Ya utilizados durante el Imperio romano, reaparecen dos órdenes, el toscano y el compuesto, agregando además el almohadillado, símbolo de la naturaleza; también comienza una nueva relación entre la obra y el espacio exterior, expresándose esto en una nueva configuración de las villas.

En las iglesias, de la continuidad espacial del Renacimiento, que se produce mediante la adición de unidades perfectas ensambladas geoméricamente, en el siglo XVI esa continuidad se transformó en una relación de elementos contrastantes. El lenguaje clásico seguirá vigente, pero expresaría la ruptura del orden cósmico del que ya se hizo mención.

Un claro ejemplo de la evolución del espacio y la utilización de la geometría en este período lo constituye el proceso del proyecto de la Basílica de San Pedro desde el diseño de Bramante (1503) hasta la intervención de Miguel Ángel (1)



Composición geométrica en planta de Bramante.

Composición geométrica en planta de Miguel Ángel

Fig. 38: Análisis geométrico de las plantas de la Basílica de San Pedro, según Bramante y Miguel Ángel
Fuente: Análisis geométrico propio.

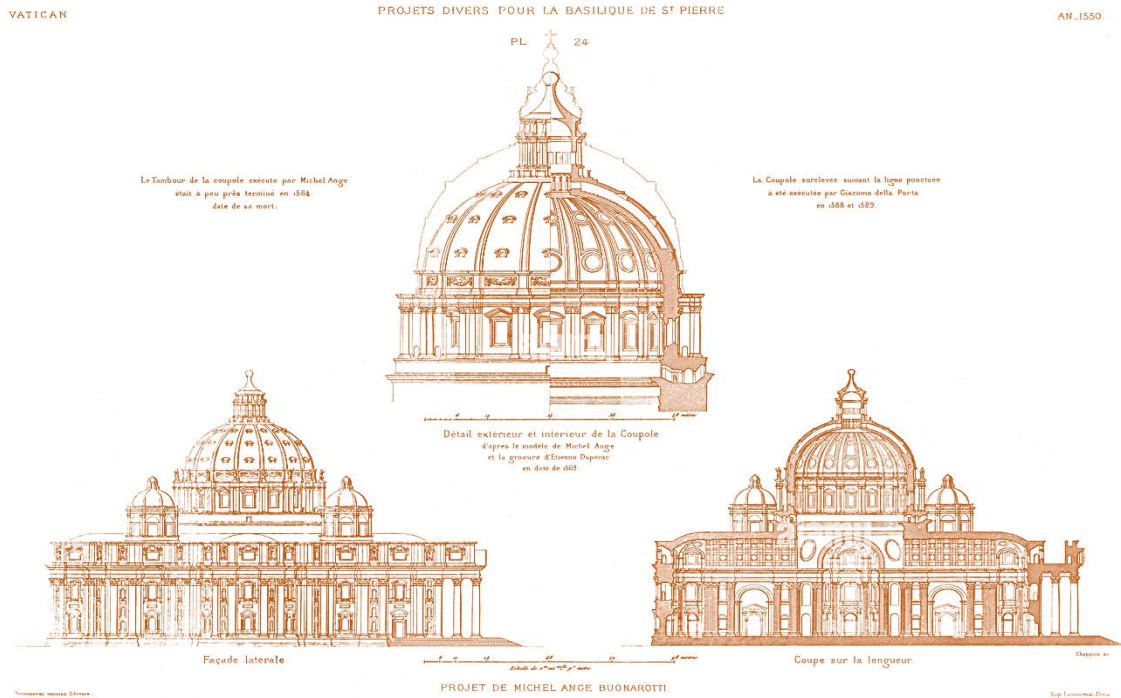


Fig. 39: Roma, Vaticano: Proyecto de Miguel Ángel de la Basílica de San Pedro, fachada lateral, longitud frontal, exterior e interior de la cúpula en 1550
 Fuente: www.alamy.com I.D imagen: 2BPPE2M



Fig. 40: Fotografía Norberg-Schultz (1999) "Arquitectura occidental", p. 127.
 Planta trazada por Miguel Ángel

Fuente: <https://www.lacamaradelarte.com/2019/03/basilica-san-pedro-del-vaticano.html>

En 1546, luego de la muerte de Bramante, Miguel Ángel se hizo cargo de la obra modificando la planta de cruz griega, eliminando las sacristías; de esta forma transformó el muro exterior en una envolvente continua del espacio interior. Por añadidura las pilastras de dicho muro, conjuntamente con las nervaduras de la cúpula acentúan una verticalidad en oposición de los elementos horizontales ondulantes; oposición que también se verifica en el exterior.

MIGUEL ÁNGEL (1475 – 1564): TRANSGRESIÓN DEL ORDEN GEOMÉTRICO ESTABLECIDO

La preocupación de Miguel Ángel no estuvo volcada a la búsqueda del equilibrio a través de las proporciones matemáticas; las sensaciones y los sentimientos, desplazarán a la razón. El espacio estuvo configurado para que así sucediera, y no se puede referir a una estructura resistente significativa pues los elementos estructurales se presentan de modo tal que contribuyeron a crear el clima deseado por Miguel Ángel.

En su Sacristía Nueva, a pesar de las analogías que puedan establecerse con la Sacristía Vieja de Brunelleschi, correspondiente a la planta cuadrada y la cúpula hemisférica, reinterpretó libremente los elementos arquitectónicos.

- El recinto, de Miguel Ángel siguió el modelo establecido por Brunelleschi; planta cuadrada cubierta con cúpula hemisférica.
- El espacio intermedio que colocó debajo de la cúpula aportó dinamismo al espacio debido a la relación entre las medidas de la planta y su altura.
- Miguel Ángel, mediante nichos y pilastras de dos niveles, creó un espacio opresivo en oposición con Brunelleschi que concibió un espacio equilibrado mediante la utilización de volúmenes geométricos puros.
- En la Sacristía Nueva se presentó las tumbas adosadas a los muros laterales.

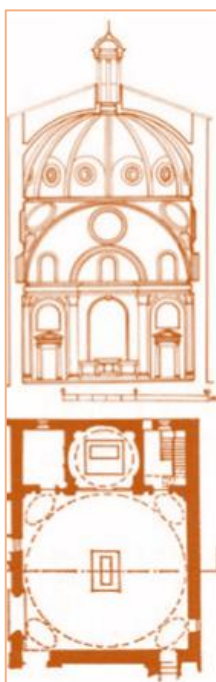


Fig. 41: La Sacristía vieja de Brunelleschi.
Fuente: Foto y documentación de Sara Lopis





Fig. 42 / 43: Sacristía Nueva

Utiliza la bicromía de Brunelleschi, pero con ello no distingue lo estructural de lo que no lo es.

Fuente: Fotografía y documentación Estabalis

Como ya se mencionó, para Miguel Ángel la razón debió ceder su sitio a los sentimientos y las sensaciones, y la estructura despojada de su función portante, cumplió un papel relevante en ello.

En el recinto que alberga la escalera de acceso de la Biblioteca laurenciana, las paredes del acceso están configuradas como fachadas, con nichos ciegos y columnas adosadas, perdiendo el muro el protagonismo.

Las relaciones entre dimensiones de planta y altura resultan inquietantes, rompiendo con la armonía tradicional del Renacimiento. Armonía que también se quiebra mediante ventanas con enormes frontones sin espacio en sus paños, dobles columnas que, en vez de cumplir su función de sostén, se empotran en la pared, asentadas en ménsulas que impiden las descargas de las fuerzas a tierra. Los muros del recinto parecen los de una fachada exterior con sus frontones y columnas vistas, utilizando la bicromía de Brunelleschi, pero con ello no se distingue lo estructural de lo que no lo es.



Fig. 44: Vestíbulo de la Biblioteca Laurenciana. Detalle
Fuente: <https://seordelbiombo.blogspot.com/2013/09/la-escalera-laurenciana-miguel-angel.html>



Fig. 45: Escalera del vestíbulo de la Biblioteca Laurenciana
Fuente: <https://historiadelarte2ffha.wordpress.com/renacimiento/renacimiento-florentino-etapa-de-crisis-del-lenguaje/biblioteca-laurenciana-escalera-en-el-vestibulo-miguel-angel-1530/>

En el espacio de acceso a la sala, la escalera actúa a modo de escultura; sus peldaños curvilíneos crean un dinamismo que se acrecienta en los tres peldaños inferiores, generándose una nueva sensación de constante crecimiento.

En la sala de lectura, Miguel Ángel guardó un ritmo y proporciones armoniosas de equilibrio, pero en el acceso parece decirnos que tal armonía no existe, las proporciones utilizadas en la relación entre el muro y las pilastras que lo encierran recuerdan sus poesías donde el cuerpo aprisiona el alma.

En él, la transgresión del orden perfecto de un sistema de proporciones geométrica y matemáticas, expresan su angustia y la de la humanidad.

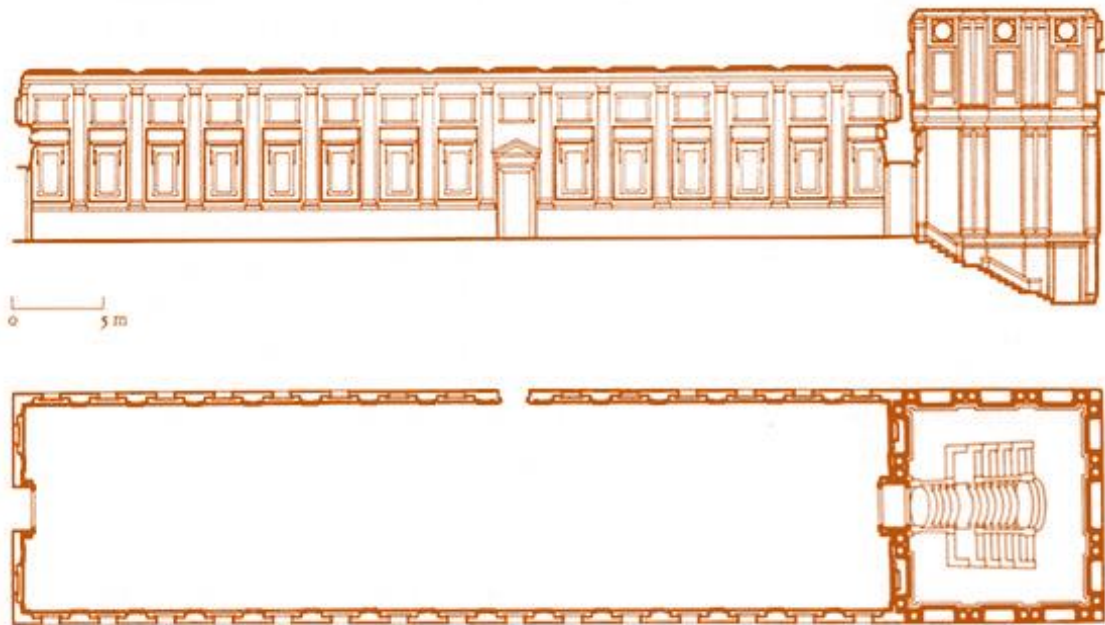


Fig. 46: Planta y corte de la Biblioteca Laurenziana. Transgresión de los sistemas establecidos de proporciones en función de las sensaciones.

Fuente: Erik Martos. <https://www.pinterest.es/pin/355854808042208545/>

ANDREA PALADIO (1508 – 1580): BÚSQUEDA DEL EQUILIBRIO A TRAVÉS DE LAS PROPORCIONES MATEMÁTICAS

En Paladio, seguidor de Vitruvio y admirador de la arquitectura romana, encontramos la búsqueda de las proporciones armónicas, pero combinando libremente elementos del lenguaje clásico, respondiendo a variables como implantación y/o necesidades funcionales. Es precisamente la consideración de estas variables por lo que se lo considera *manierista*.

Palladio admiró la arquitectura de los antiguos por la unión de dos características: por un lado, los contenidos ideales y por el otro, la adaptación de la construcción a la función.

En toda la obra de Palladio aparecen bien claros estos dos momentos: el ideal clásico como suprema imagen de un modo de vida civil perfecto, y la respuesta a una exigencia práctica, el ceñirse a circunstancias específicas de lugar y de hecho como determinaciones de dicho ideal en los casos, siempre distintos, de la vida real. (Argan, 1976, p. 222).



Fig. 47: Villa Rotonda Paladio.

Fuente: https://temasycomentariosartepaeg.blogspot.com/p/blog-page_724.html

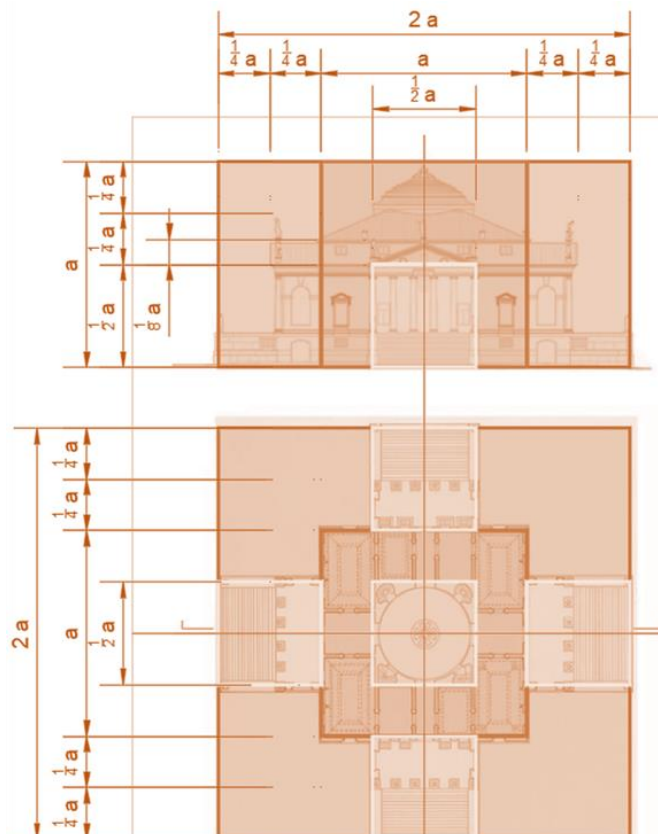


Fig. 48: Trazado geométrico de la Villa Rotonda
Fuente: Análisis geométrico propio.

El trabajo de Palladio basado en gran medida en los valores de la arquitectura de la antigüedad clásica, muestra su preocupación por la materialidad. Muchas veces utilizó elementos estructurales, no por su función portante, sino en función de la composición.

En el palacio Chiericati, en los extremos de ese cuerpo central, colocó cuatro columnas en cada extremo cuya función fue conseguir una sensación de tridimensionalidad y romper la monotonía de los intercolumnios. Es en estos elementos en los que se encuentra el manierismo de Palladio.



Fig. 49: Palacio Chiericati.. Fuente: <https://www.epdlp.com/edificio.php?id=606>

Para Miguel Ángel, sus creencias, científicas y religiosas llevaron al replanteo de las órdenes clásicas y la geometría que ello conlleva a efecto de expresar sus sentimientos. Palladio, en cambio realiza una búsqueda de la perfección de sus villas, refugiándose en las proporciones, único valor verdadero y perdurable, encontrando en la Villa Rotonda su más acabada obra.

I.5. SIGLO XVII: “EL PARADIGMA CARTESIANO NEWTONIANO” HACIA UNA NUEVA FORMA DE DISEÑO

CONTEXTUALIZACIÓN

Diversos procesos culturales, que se venían gestando desde el siglo XVI, quedan expuestos y afincados durante el siglo XVII. Hasta el año 1500 de nuestra era, las culturas europeas tenían una visión orgánica del universo; a lo largo de los siglos XVI y XVII, la cosmovisión sufrió un cambio radical. De una cosmovisión *orgánica* a una concepción que se expresó a través de una metáfora *maquinal*, que terminó en convertirse en el emblema de la edad moderna. Durante el siglo XVII se comienza a estudiar las características materiales y las dimensiones de los elementos.

Otro proceso que estalló en el siglo XVII consistió en que la Iglesia Católica ya no era el único sistema de valores; ni religiosos, ni científicos, ni filosóficos. A partir de la Reforma y su respuesta con el Concilio de Trento, la Iglesia abordó al arte y la arquitectura como medio de persuasión y propaganda; a tal fin se abandonó la búsqueda de la perfección de la forma del Renacimiento, para acudir a las sensaciones y las emociones, siendo esto fundamental para el desarrollo de la configuración espacial.

A efectos de responder a la crítica del carácter estático de las estructuras clericales, en el arte y la arquitectura, se utilizaron conceptos geométricos -hasta el momento despreciados-, que indicaban movimiento y dinamismo, como lo es la elipse, reemplazando al círculo, símbolo de la perfección divina; la elipse al tener dos focos en vez de un único centro y carecer de un radio constante, marcó el dinamismo institucional. En esa misma línea propagandística, se puede mencionar la creación de la Compañía de Jesús, la cual prácticamente monopolizó la educación secundaria y universitaria de Europa.

El ser humano de aquel siglo siguió siendo religioso, pero se acercó a la materia, comenzando su dominio de la naturaleza mediante la ciencia. Galileo, Descartes, Newton y Leibniz, marcaron el camino hacia la razón.

En el ámbito de la matemática, alrededor de 1636, Descartes y Fermat, al relacionar el álgebra con la geometría sentaron las bases de la geometría analítica; Descartes impone

un sistema de referencia ortogonal arbitrario de ubicación de puntos del plano: los ejes cartesianos.

El sistema de ejes arbitrarios de ubicación de puntos en el plano y el análisis matemático derivó en el siglo XIX en la formulación de los espacios vectoriales, modelo matemático actual del espacio real que en el siglo XX serán la base de los sistemas informáticos de representación y luego de diseño.

Otro de los grandes aportes científicos fue realizado por Galileo Galilei (1564 – 1642) quien desarrolló una física matemática deductiva y abstracta; este hecho supuso, por un lado, un nuevo enfrentamiento entre la ciencia y la Iglesia Católica, y la ruptura con las teorías de la física aristotélica.

En lo económico, durante este siglo en Europa se tendió a generalizar las políticas económicas mercantilistas lo que, unido al gran avance de la ingeniería basado en el cálculo y ya no en la pura experimentación, condujeron a la racionalización material del siglo XVIII.

En este mundo convulsionado, no solo se libera a la geometría de los preceptos euclidianos al establecer un sistema referencial arbitrario y no absoluto como son los ejes cartesianos; la mente se libera de conceptos establecidos a priori lo que significó un cambio sustancial en el espacio, tanto interior como exterior.

GALILEO - DESCARTES: INICIO DEL PARADIGMA CARTESIANO – NEWTONIANO

La física matemática de Galileo dará el puntapié para el desarrollo de los cálculos estructurales en los siglos XVIII y XIX. Habiendo comenzado Galileo con el problema de la viga en voladizo cargada con su peso propio y un peso adicional en el extremo, este desarrollo conocido como “el problema de Galileo”. Se pasa de la visión ptolemaica a la visión copernicana del universo:

¿Qué sucede en la concepción del mundo cuando se pasa de la concepción ptolomeica a la concepción copernicana? Sucede que en vez de aceptar una estructura del mundo como la revelada por la suprema autoridad espiritual (...) se trata de descubrir la realidad, la verdad, en el desarrollo de la experiencia individual que comienza justamente en el renacimiento con Leonardo y que desarrolla Galileo. (Argan, 1973, p. 19).

La revolución científica del Renacimiento comenzó con el heliocentrismo de Copérnico y creció con el aporte de Galileo, culminará un siglo después, con la mecánica de Newton. A lo dicho debemos sumar el avance en el análisis matemático realizado por Newton y Leibniz al encarar el cálculo infinitesimal que supuso el primer abordaje científico, lógico y filosófico del estudio del movimiento y el estudio de los sistemas dinámicos; basado en estos avances, el cálculo estructural crecerá exponencialmente.

Para Galileo, la naturaleza escribió su libro con lenguaje matemático, mediante figuras geométricas; a pesar de ello, comprendía que las propiedades geométricas de los cuerpos no son las únicas que explican sus comportamientos, era necesario también observar sus propiedades materiales; por lo que el comportamiento estructural dependió, no sólo de la geometría y las proporciones, sino que importó también el material y el tamaño.

Con Galileo nace la mecánica, que se conformó -desde un principio- como una teoría aplicable a cualquier tipo de estructuras, ya sean naturales o máquinas construidas por el ser humano, y pronto se trasladó a la arquitectura: a elementos constructivos y estructurales como pilares, ménsulas, cubiertas y muros, estableciendo una analogía con el razonamiento maquinal.

Gran parte de los desarrollos matemáticos de Galileo se dirigieron al estudio de las máquinas y las estructuras portantes, estableciendo la unión irreductible de cálculo matemático y estructura resistente; con posterioridad será el análisis matemático el que ordene el cálculo estructural.

El material y sus propiedades comienzan a cobrar protagonismo. En este camino a la razón, y de ésta aplicada a la arquitectura, fue fundamental el aporte de Descartes con su planteo del plano cartesiano y la geometría analítica. La importancia del sistema coordenado de ejes residió en que se estableció un sistema de referencia en el plano y, por ende, en el espacio, lo que permitió establecer las relaciones de cuerpos entre sí y con un sistema abstracto arbitrario que procuró relacionar, gracias a la geometría y el cálculo, puntos del plano y del espacio.

BERNINI Y BORROMINI: GEOMETRÍA EUCLIDIANA PARA DOS CONCEPCIONES ESPACIALES DISTINTAS

En el siglo XVII, al aceptar el ser humano su libertad de cánones establecidos, se desarrollaron dos posturas; tendencias en la arquitectura religiosa, traducidas en sendas configuraciones espaciales, estando el uso de la geometría en función de cada una de ellas. En Bernini visualizamos un arte en función de una ideología y un propósito determinado: la propaganda de la Iglesia y en Borromini, la búsqueda de nuevos caminos liberados y de axiomáticas preestablecidas.

Bernini en su “Columnata de San Pedro”, utilizó la geometría en apoyo a un sistema determinado: el eclesiástico. Con la columnata no sólo se simbolizaría el abrazo de la Iglesia a la comunidad, sino que expresó la decisión de cambio de la institución en función de las necesidades del pueblo.

Al utilizar un óvalo en el trazado de la planta de la columnata, Bernini remite al dinamismo de la estructura de la Iglesia; ya no existe el espacio geométrico estático de la planta circular con un único centro, sino que se encontró con un espacio dinámico, planta ovalada, con dos focos donde las visuales cambian constantemente; hecho reforzado por el empleo de cuatro hileras de columnas. Lo que se debe tener en cuenta es que el trazado del óvalo de Bernini se basa en el trazado de la *vesica piscis*, y ésta no es otra cosa que el símbolo de Cristo utilizado en las catacumbas de los primeros cristianos. Concluyendo, nos encontramos con una institución que acepta los cambios de los tiempos pero que, en su fundamento, sigue presente Cristo.



Fig. 50 / 51: Foto aérea de la plaza y trazado geométrico del óvalo de la Columnata. Fuente: Trazado geométrico propio

Borromini, a diferencia de Bernini, se introdujo en la búsqueda de nuevas formas espaciales logrando la integración entre espacialidad y estructura resistente mediante el manejo de la geometría de regla y compás, alejándose de los elementos escenográficos del espacio de sus contemporáneos. El trabajo de Borromini se basó en círculos y triángulos con sus traslaciones en el espacio. Para la religión cristiana, el círculo simbolizó la eternidad de Dios; y el triángulo, la Santísima Trinidad.

En su tratado *Opus Architectonicum* señaló a San Carlino alle Quattro Fontane y San Ivo alla Sapienza como sus obras más notorias.

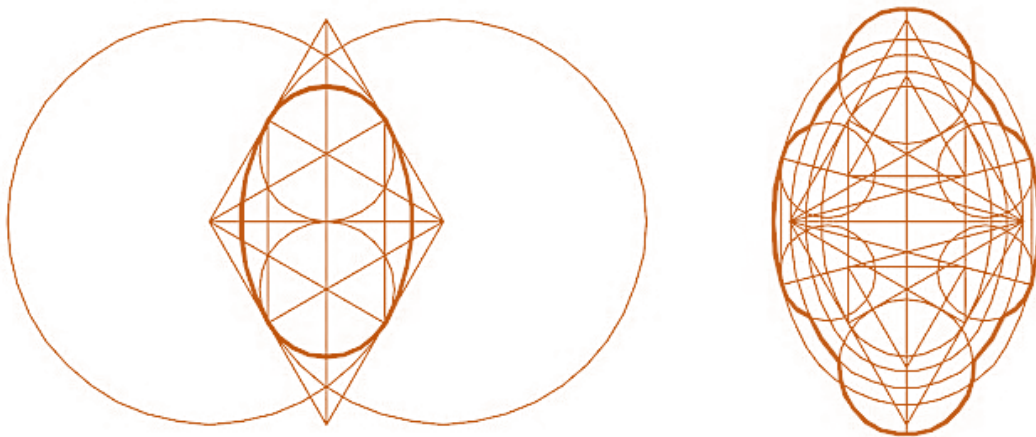


Fig. 52: Iglesia de San Carlino. Francesco Borromini, 1641. Esquema geométrico del diseño de la planta
diseño de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

La planta de San Carlino alle Quattro Fontane parte del trazado de un óvalo, utilizando el sistema formado por dos pares de triángulos equiláteros con lados de distinta longitud. A partir del óvalo se levantaron las columnas que sostendrán el tambor que soporta la mitad del ovoide que constituye la cúpula.

Mediante la resolución geométrica del espacio, junto a la decisión estructural de efectuar el pasaje de una serie de curvas en planta al elipsoide de la cúpula, logró la percepción visual de la totalidad espacial.

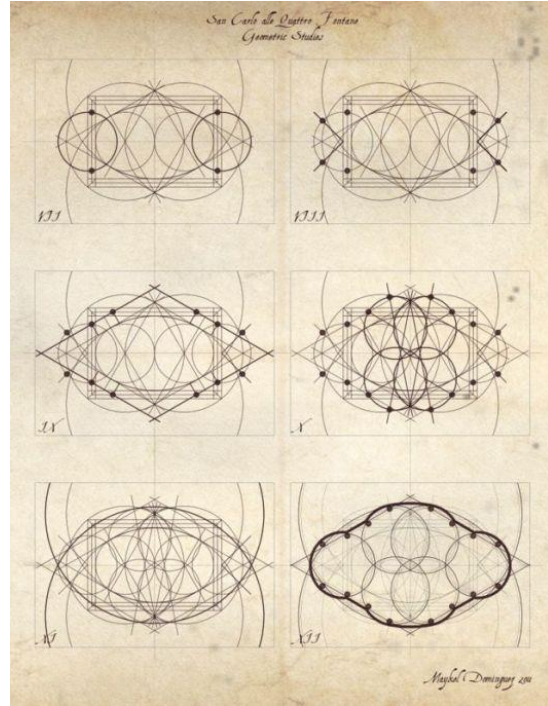


Fig.53: Trazado original de la cúpula San Carlino alle Quattro Fontane.
Fuente: Gráfico de Miguel Domínguez, disponible en <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/san-carlo-alle-quattro-fontane/>

La planta de Sant Ivo alla Sapienza también se organizó en base a triángulos equiláteros y círculos; la estrella de David formada en base a los triángulos y los círculos trazados a parir de ella generó la integración del espacio.

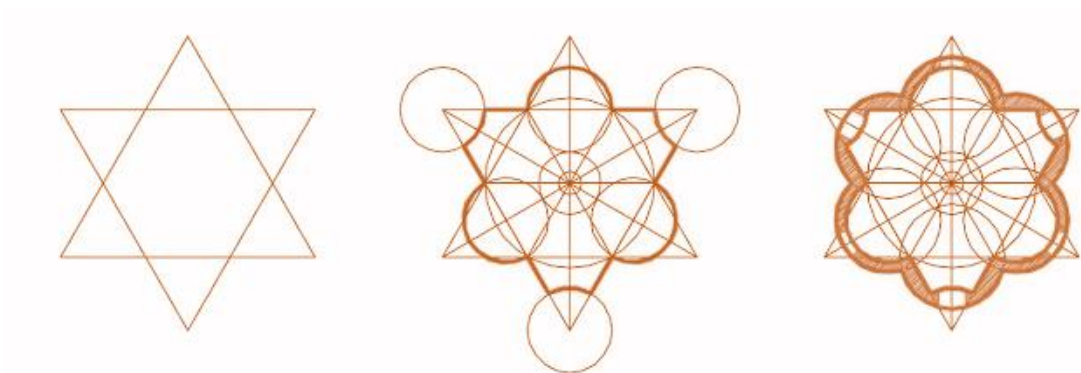


Fig. 54: Iglesia de Sant Ivo alla Sapienza. Francesco Borromini. interpretación geométrica de los elementos espaciales que originan la planta.
Fuente: Elaboración propia.

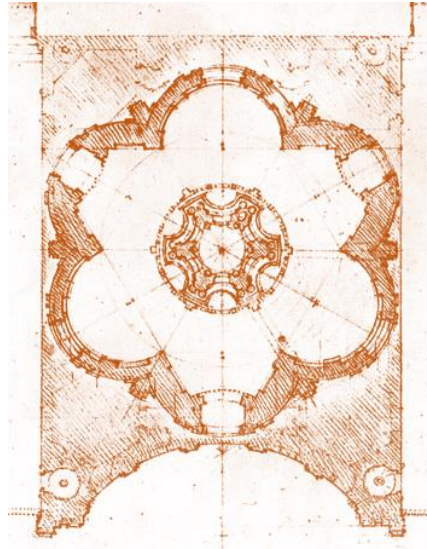


Fig. 55: Sant Ivo alla Sapienza.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/floor-map-of-SantIvo-Albertina-Vienna_fig1_259342383

El espacio interior es cubierto por una cúpula formada por triángulos esféricos. Con base en elementos geométricos y la participación de la luz permitida por la propia geometría y la estructura, Borromini logró su ideal de espacio unitario continuo.

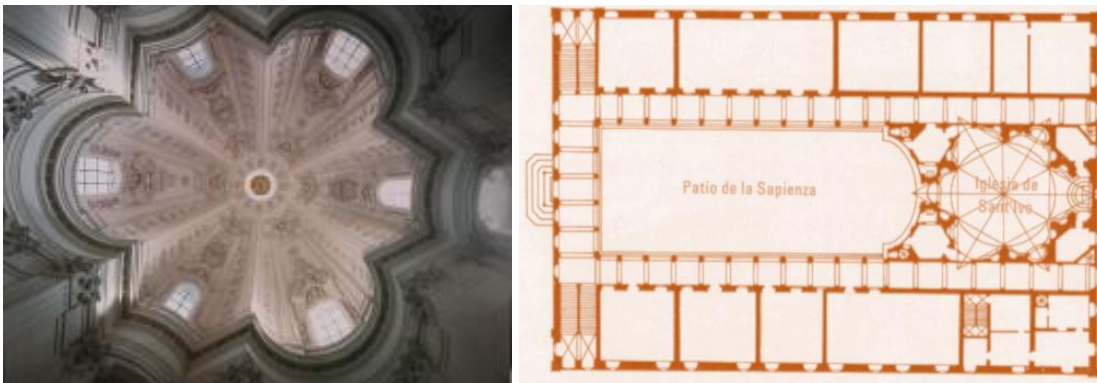


Fig. 56: Vista interior de la cúpula de la Iglesia de Sant'Ivo y planta.

Fuente: <https://fineartamerica.com/featured/interior-view-of-the-cupola-of-the-church-sant-ivo-alla-sapienza-italian-school.html?product=pouch>

EFICACIA Y OPTIMIZACIÓN

A mediados del siglo XVII comenzó a aplicarse a la construcción, los conceptos de eficacia y optimización, ya empleados en el diseño de máquinas y sobre todo de máquinas militares. Las normas clásicas fueron siendo desplazadas por los conceptos de eficacia y optimización. Se inició así, un proceso irreversible de racionalización conducente al funcionalismo del siglo XX.

Mientras tanto, en el ámbito académico de Francia -y por orden de Jean-Baptista Colbert, ministro de finanzas de Luis XIV- se inició un estudio exhaustivo de los materiales de construcción utilizados en la época.

Robert Hooke enunció en 1678 la “Ley de Hooke”, surgida de sus estudios referidos a elasticidad, en búsqueda de un resorte que reemplazase el péndulo de los relojes. “Mariotte, en 1670, aplicó la Ley de Hooke a las fibras de una viga y observó que algunas de ellas se estiraban y otras se acortaban y definió como frontera la profundidad media de la viga, desarrollando el concepto de ‘eje neutro’”. (Benévolo, 1987, p. 20).

ÚLTIMAS DÉCADAS DEL S. XVII

En 1674 ocurrió un hecho, que juntamente con la racionalidad que se expande en la sociedad y el trabajo publicado en 1690 por Claude Perrault (1613 – 1688): “Ordenamiento de cinco especies de columnas según el método de los antiguos”, marcó un nuevo rumbo en la mirada sobre los entes geométricos y matemáticos como elementos ordenadores indiscutibles de la arquitectura.

En ese año, la Academia Real de Arquitectura Francesa envió a Antoine Desgodetz (1653–1728) a un viaje de relevamiento de monumentos romanos cuyos resultados fueron publicados en 1682, a efectos de estandarizar los detalles de la arquitectura académica en Francia, pero Perrault en su publicación presentó un análisis comparado del conjunto de proporciones propuestas para los Órdenes de Vitrubio y los tratadistas renacentistas y las relevadas por Desgodetz en los monumentos romanos. De este proceso de Perrault surgió un hallazgo inesperado: las proporciones indicadas por los tratadistas no coincidían entre sí y tampoco la diversidad de proporciones utilizadas para la construcción de los templos romanos en la práctica, por lo que concluyó en que las órdenes clásicas eran una simple convención, perdiendo así su carácter de irrefutabilidad.

Esta concepción hizo dejar de lado, paulatinamente, la composición de los órdenes clásicos y la idea de armonía basada en las proporciones geométricas en la configuración espacial, para enfrentar una nueva forma de diseño. Siendo su formación -la de médico y físico-, al interesarse por la arquitectura trató de infundirle una visión científica independiente de los cánones arquitectónicos del momento.

El fin definitivo de la entronización de las proporciones matemáticas como garantes de la armonía universal y la belleza, lo darán Hume y Burke en el siglo XVII.

I.6. SIGLO XVIII: GEOMETRÍA E ILUSTRACIÓN

CONTEXTUALIZACIÓN

El siglo XVIII se caracterizó, en algunos países europeos, por el análisis, crítica y reformulación de lo establecido, a la luz de la razón. En esta época, en función de las investigaciones científicas, en las ciudades más grandes de Europa, se crearon instituciones destinadas a tal fin: las Academias de Ciencias subsidiadas por el Estado. Gradualmente creció el papel de los centros superiores de enseñanza, haciéndose particularmente notable hacia finales de siglo, en la época de la Revolución Francesa. Es así como surge una capa de científicos profesionales, como por ejemplo los matemáticos-profesionales, cuya principal preocupación es la investigación científica y la enseñanza. Entre ellos, Leonard Euler (1707–1783).

Entre finales del siglo XVIII y la primera mitad del siglo XIX, se produjeron grandes progresos en los ámbitos de las ciencias naturales debido a los estudios sobre taxonomía, anatomía comparada y evolución de las especies. Este hecho mostrará, posteriormente, su impronta en diversas disciplinas y por supuesto en la arquitectura.

Entre los trabajos más influyentes de esta época se encuentran los de Georges-Louis Leclerc, Conde de Buffon: *Histoire Natureles* de 1749, Carl Linneus: *Species Plantarum*, 1753 y Vicq d'Azyr: *Traité d'Anatomie er de Physiologie*, 1786.

El proceso de desarrollo de las matemáticas se hace cada vez más complejo a lo largo de la historia del ser humano, pero sin lugar a duda, el siglo XVIII ocupó un lugar predominante: en este siglo la complejidad y multilateralidad del desarrollo matemático, alcanzó un alto grado, sólo superado en el siglo XX, gracias a la intervención de la informática.

El ritmo de desarrollo de la ciencia en esta época aumentó rápidamente en respuesta a las nuevas problemáticas sociales y económicas, por ejemplo, la formación de un mercado mundial conllevó el desarrollo de la navegación y construcción naval.

Los avances físicos y matemáticos de este siglo fueron fundamentales, en el siglo XIX, para el auge de las estructuras de acero y en el siglo XX para el desarrollo de nuevos sistemas estructurales, la difusión de estos avances, se vieron favorecidos por el perfeccionamiento de la imprenta.

En el arte y la arquitectura aparecieron dos corrientes. La conciencia artística se escinde en dos bandos que pugnan entre sí. Uno de estos grupos, fieles al pasado, se vuelcan a la Antigüedad Clásica, el Renacimiento o el Gótico; y el otro, se planteó utilizar medios expresivos nuevos en la resolución de los problemas artísticos.

Según Gonzalo Bustillo (2014), en esta época la Arquitectura fue sometida a un proceso de racionalización tanto funcional como material.

LA CAÍDA DEFINITIVA DE LAS PROPORCIONES COMO SÍMBOLO DE BELLEZA Y ARMONÍA

En 1757, Hume publicó una serie de ensayos bajo el título *Ensayos morales, políticos y literarios*. En uno de ellos (“Sobre la norma del gusto”) transformó la objetividad de la estética clásica en la subjetividad de la sensibilidad. al rechazar que la belleza sea intrínseca al objeto además de afirmar que nada es más contrario a las leyes de la crítica que contener los ímpetus de la imaginación y reducir toda expresión a la verdad y exactitud geométrica. (Hume, 2011).

En el mismo año, Burke ([1757], 2014) publicó “*Indagación filosófica sobre el origen de nuestras ideas acerca de lo sublime y lo bello.*” En la parte III del texto dedicó sendas secciones, tanto a la belleza como a razonar acerca de que la belleza no depende de las proporciones ni en el ser humano, ni en los vegetales, ni en los animales, afirmando que la belleza no exige auxilio de nuestro razonamiento, ella no es una idea que se pueda medir ni tiene nada que ver con el cálculo y la geometría. Refiriéndose a la arquitectura declaró que nada más inexplicable y caprichoso, que el hecho de que un arquitecto someta su labor a la figura humana, pues no hay dos cosas que puedan tener menor similitud o analogía que un ser humano, una casa o un templo.

La estructura clásica de belleza se irá derrumbando junto con la cosmovisión que la sostenía, pero todavía habrá un grupo de artistas y arquitectos que se aferraron a las proporciones y las reglas clásicas reformulándolas en cierto sentido.

RACIONALIDAD FUNCIONAL Y MATERIAL. CÁLCULO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS MATEMÁTICO

En esta época, signada por la razón, existió una identificación entre lo bello y lo necesario, por lo que belleza y estilo dependerían de la funcionalidad. La racionalidad, en la que habita la ciencia, el progreso y la técnica, marcaron la producción arquitectónica.

La Antigüedad fue asumida como modelo en búsqueda de la perfección. Se examinó la perfección estética y ética: nuevamente, la búsqueda del absoluto, pero esta vez en la racionalidad.

Valores como la simetría y las proporciones volvían a posicionarse en el diseño, pero ya no por un valor estético, sino al servicio de la composición. Las proporciones matemáticas ya no estuvieron puestas a disposición de los órdenes clásicos, sino al servicio del rendimiento de materiales y estructuras.

Según Argán (1973, p. 134) en la arquitectura del 700 pudo encontrarse el agotamiento de una concepción tradicional del espacio y, por lo tanto, la preparación de una nueva concepción espacial⁷. La organización espacial de actividades también será afectada por la exigencia de eficacia, como en los demás ámbitos de la arquitectura.

Los proyectos de la Academia Francesa de las Ciencias para el *Hotel Dieu* de París, basados en estudios de circulación de aire y el proyecto de Jeremy Bentham para el edificio Panóptico de 1787, que logró el dominio visual absoluto de todo un gran espacio interior desde un único punto que no podía a su vez, ser visto, ponen en evidencia la difusión de estas nuevas ideas.

A partir de la segunda mitad del siglo XVII se impone, en la arquitectura, un proceso de racionalidad funcional del espacio de acuerdo con fines educativos, sanitarios o productivos.

⁷ Argán, G (1973) "El concepto del espacio arquitectónico. Desde el Renacimiento al Barroco. Ed. Nueva Visión Buenos Aires

Debido al cambio en la ideología de la época referida a presos, niños y enfermos y a las necesidades que surgen del mercantilismo, aparecen tanto hospitales, cárceles y guarderías, como fábricas. Existe un cambio en las demandas hacia la Arquitectura.



Fig. 57: El panóptico tipo de arquitectura carcelaria ideada por el filósofo utilitarista Jeremy Bentham hacia fines del siglo XVIII.

Fuente: <https://www.urbipedia.org/hoja/Pan%C3%B3ptico>.
<https://www.yorokobu.es/panoptico-camaras-vigilancia/>

Las políticas mercantilistas desarrolladas en el siglo XVII impusieron en el siglo XVIII, estrategias tendientes a lograr balanzas comerciales favorables, limitando la importación de productos y fomentando la producción nacional.

En el ámbito de la racionalización material, el texto *La Science des Ingénieurs* de Bernard Forest de Belidor, publicado en Paris en 1729, fue el primer tratado sobre problemas de construcción basado en principios matemáticos y métodos algebraicos, en lugar de aplicar las reglas tradicionales, representó un cambio de dirección en cuanto al dimensionamiento de la estructura a partir de procedimientos numéricas y a la organización de los trabajos de construcción.

Otro texto de Belidor, *Architecture Hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*, editado entre 1737 y 1753, trató temas como la construcción de puertos, faros y demás edificaciones auxiliares en obras marítimas, incluidas las fortificaciones necesarias para su defensa. Este tratado es considerado uno de los más influyentes en la formación de los ingenieros en las Academias Militares durante el siglo XVIII.

El matemático James Bernoulli volvió a afrontar el problema de la viga en voladizo cargada, planteado por Galileo, suponiendo que, durante la flexión, toda sección plana de una viga permanecería plana. Con posterioridad, su hermano y su hijo enunciaron el

principio de los desplazamientos virtuales y la determinación de la curva elástica de barras flexionadas respectivamente.

Otro matemático, Euler, estudió los problemas de elasticidad en vigas y columnas, mientras que Coulomb realizó el estudio de los esfuerzos en una viga de sección rectangular.

En 1777, Abraham Darby levantó el puente de arco sobre el Severn, de hierro colado, donde dicho material encuentra, por primera vez, aplicación en mayor escala. Este material, se puso al servicio de las nuevas tareas constructivas de la era industria, de las cuales derivaría una nueva intencionalidad arquitectónica utilitaria.

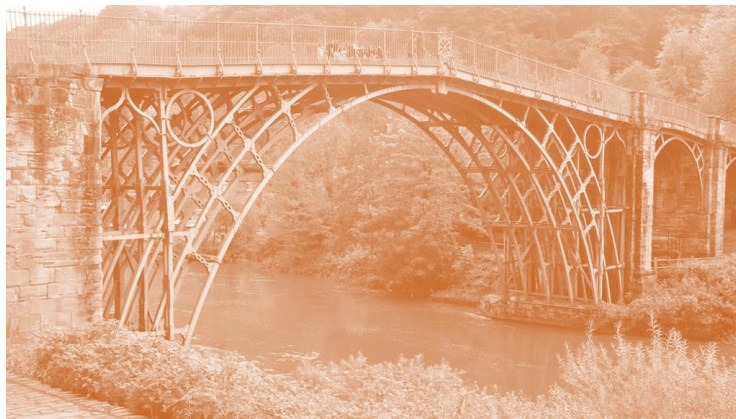


Fig. 58: Puente sobre el Severn, de hierro fundido trabajado como si se tratara de dovelas.
Fuente: <http://www.arquitecturaenacero.org/historia/puentes/puente-shropshire-sobre-el-rio-severn-coalbrookdale-gb>

Fue durante la segunda mitad del siglo XVIII, por lo tanto, cuando la ingeniería comenzó a existir como ciencia independiente en el mundo académico y surgió una nueva figura: el ingeniero civil moderno, que basaba sus diseños en el cálculo científico. Se estableció, por primera vez en esta época, la dualidad entre arquitectos e ingenieros. Los arquitectos se debatían en búsquedas formales, mientras los ingenieros comenzaron a resolver problemáticas de la nueva sociedad.

I.7. SIGLO XIX: REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. AVANCE DEL MODELO BIOLÓGICO SOBRE LA LÓGICA NEWTONIANA.

CONTEXTUALIZACIÓN

La revolución industrial provocó grandes cambios en la arquitectura y el urbanismo durante la segunda mitad del siglo XIX: estaciones de ferrocarril, palacios de exposiciones, mercados, viaductos, teatros, edificios administrativos, bibliotecas, academias, galerías comerciales, etc. Nuevas necesidades para abastecer con el uso de nuevas tecnologías y materiales.

Desde las ciencias naturales, se confronta a una época de grandes progresos con el surgimiento de múltiples trabajos científicos sobre anatomía comparativa y taxonomía zoológica, y una progresiva profundización en las ideas evolucionistas.

La ciencia vuelca su mirada a las ciencias naturales como lo hiciera en el siglo XVII hacia la mecánica. Este cambio de mirada llevará a la biología a comenzar su posicionamiento frente a la lógica newtoniana, con gran repercusión en la arquitectura.

El concepto de organismo, elaborado por la biología permitió establecer la relación entre las visiones clásica y moderna de naturaleza.

Es sabido que las investigaciones de Copérnico, Galileo y Newton sentaron las bases científicas que permitieron desacralizar el universo, demostrando que la Tierra no se encontraba en su centro. Charles Darwin (1809–1882), hizo de los seres vivos el objeto de su obra científica y, como aquellos, llegó a conclusiones que lo enfrentaron a la Iglesia y al pensamiento tradicional. Con Darwin se estableció la ruptura con la concepción teológica del universo como creación de un Dios benevolente; la unidad y la belleza que caracterizaban a la naturaleza dejan de ser definidas en términos filosóficos o religiosos, para ser precisadas en términos facticos y científicos que determinaron la evolución de las especies.

En la segunda mitad del siglo XIX, el surgimiento de la teoría evolucionista supuso una nueva visión de la naturaleza. Los estudios sobre la evolución y, sobre todo, el descubrimiento de la “Selección Natural”, marcó el nuevo rumbo de la biología. Una corriente evolucionista impregnó el mundo de la ciencia.

Sobre el enfrentamiento con la Iglesia, la teoría de Darwin contradecía a la Biblia. Esto implicó la ruptura de la concepción, no única pero hegemónica, de un dios creador del universo, la naturaleza pasa a ser entendida en los términos científicos, en vez de filosóficos o religiosos. Se comenzó a buscar en la naturaleza sus virtudes demostrables, verificables. Aquellas que jugaron un papel decisivo en la teoría de la evolución como la adaptación, adecuación y funcionalidad. Lo que se denominó “adaptación funcional”.

LA FÍSICA MATEMÁTICA Y EL AVANCE ESTRUCTURAL

Louis Marie Henri Navier, creador de la teoría general de la elasticidad, basándose en las lecciones que impartió en *L'École Polytechnique* de París, publicó en 1826 la primera edición de sus “*Leçons*”, el primer texto de Mecánica en la Ingeniería.

Este texto no sólo representaba un buen tratado sobre la resistencia y las deformaciones de vigas de cualquier sección, sino que, además, incluía un análisis de diversos elementos y construcciones estructurales, sometidos a cargas centradas o excéntricas. Desarrolló la teoría general de los sólidos elásticos y el primer tratamiento sistemático de la teoría de estructuras.

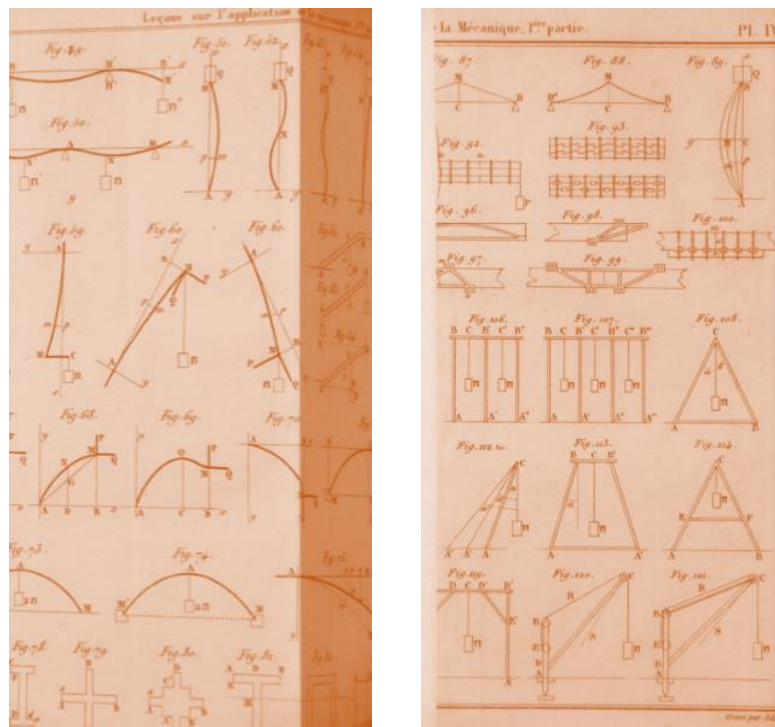


Fig.59 y Fuente: Claude-Louis-Marie-Henri Navier - *Résumé des leçons données à l' école Royale des ponts et des chaussées sur l'application de la Mécanique à l'établissement des constructions et des machines* - 2 volumes - 1826/1838.

Otros elementos de relevancia de la época, para las estructuras, fueron:

- Lamé y Clapeyron introdujeron el concepto de igualdad del trabajo externo e interno en una estructura deformada en 1833.
- En 1852, Lamé publicó el primer libro sobre elasticidad y Clapeyron en 1857 presentó un análisis de vigas continuas mediante el "Teorema de los Tres Momentos".
- Barré de Saint-Venant estudió en las vigas curvas, el esfuerzo de flexión. En una publicación de 1855 trató el problema de la torsión y en 1856 presentó problemas relativos a la flexión, considerando por primera vez correctamente los esfuerzos de corte en las secciones transversales de vigas. Impacto y vibración, son otros temas abordados por él.
- Duhamel trabajó en la teoría de la vibración de los cuerpos elásticos. En 1834 presentó "*Mémoire sur les Vibrations d'un Système Quelconque de Points Matériels*", introdujo el cálculo de integrales para resolver la problemática de los desplazamientos producidos por una fuerza variable que se utilizaría en la actualidad para el cálculo sísmico.
- Los conceptos de esfuerzo y de deformaciones principales, tal como hoy los conocemos, fueron introducidos por Agustín Louis Cauchy.

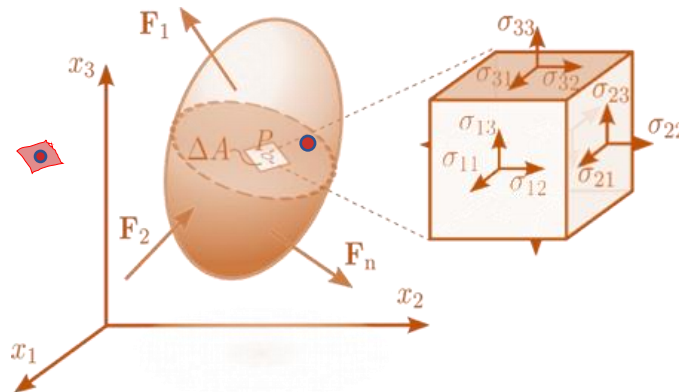


Fig. 60: Representación gráfica de las componentes del tensor de esfuerzos en un punto p de un sólido deformable.

Fuente: Gráfico propio

- Vladimir Shukhov, a efectos de optimizar el rendimiento de recursos, a fines del siglo XIX, comenzó a trabajar con materiales y geometrías que le permitan rapidez, ligereza y economía al montar una obra. Analizó superficies de doble curvatura y utilizó ecuaciones diferenciales basándose en los trabajos Chebyshev y Lobachevsky, descubrió una nueva familia de sistemas estructurales: los

hiperboloides de revolución y los paraboloides hiperbólicos, llegando a construir una superficie de doble curvatura, partiendo de una superficie reglada.

A partir de la puesta en obra de elementos lineales simples y estandarizados, como son los perfiles normalizados de acero, obtuvo una superficie compleja de doble curvatura, inédita hasta el momento de gran resistencia dependiente de la geometría de generación.

Lo importante de estas geometrías era la obtención de superficies curvas, que disminuían tensiones, basándose en una generación de mallas de gran rigidez, partiendo de rectas. La Torre Shabolovka en Moscú y el Faro de Adziolog en Ucrania son algunas de sus obras más espectaculares.



Fig. 61: Tres torres diseñadas por Shukhov. de izquierda a derecha: Depósito elevado de agua para la “Exposición industrial y artística de toda Rusia” (1896), proyecto original Torre Shabolovka (1919) y faro de Adziolog (1908).

Fuente: https://www.urbipedia.org/hoja/Vladimir_Shukhov

EL AVANCE EN LA INFLUENCIA DE LA BIOLOGÍA SOBRE LA ARQUITECTURA

Antes de que George Cuvier (1769 – 1832) publicase *Leçons d’Anatomie Comparée* (1800), los estudios de los naturalistas se basaban en clasificar a los animales y plantas por sus características visibles, estableciendo un sistema de organización de los especímenes, fundado en números, proporciones y disposición de las partes en el todo. Cuvier, en su publicación clasificará a los organismos en base a la función o papel que cada órgano desempeñaba.

Los principios de clasificación y análisis de Cuvier pueden verse reflejados en el planteamiento de teóricos e historiadores de la arquitectura de mediados del siglo XIX, como Gottfried Semper y Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, al interpretar la forma como una organización de partes dentro del todo, cumpliendo cada una de ellas una función determinada.

En 1809, Jean-Baptiste Lamarck (1744 – 1829) en “Filosofía zoológica” propone la evolución de las formas, en vez de su creación e inmutabilidad. Por su parte, Henri Labrouste (1801-1875), estableció la relación entre forma y función en la construcción, dotando a la arquitectura de un argumento orgánico funcionalista, en línea con las ideas evolucionistas de Cuvier y Humboldt, su teoría se basa en la idea de la selección natural.

El concepto de “función” fue fundamental para la biología moderna e incidió en la arquitectura manifestándose, en primer momento, con la relación entre forma y función.

A mediados del siglo XIX, la taxonomía empleada en la biología se adoptó como modelo para la clasificación de los edificios. Viollet-le-Duc, de hecho, no se limitó a analizar las características visibles de los edificios del pasado, sino que además intentó comprender su lógica interna.

Así como en la nueva mirada de la biología se distinguió entre el aspecto exterior y la organización interior de los seres vivos; Viollet-le-Duc diferenció entre la forma o apariencia del edificio y el sistema portante o estructura. Mientras que la forma era la parte visible del edificio, la estructura era una abstracción derivada de la lógica de la organización interna de las partes, siendo cada parte definida por su función o propósito. Para Violet Le Duc, en la arquitectura gótica cada parte de la estructura tenía un papel o función determinada en la configuración del todo.

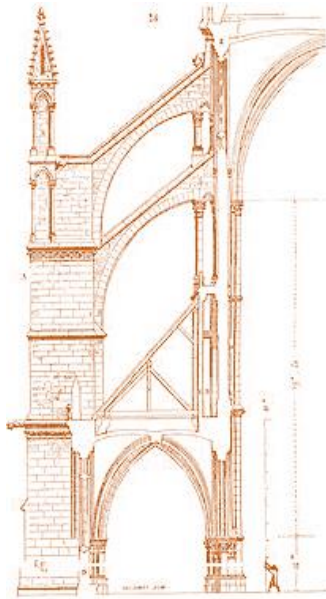


Fig.62: Esqueleto estructural de la Catedral Gótica
Fuente : Sección de la Cathédrale D'Amiens
Viollet le Duc

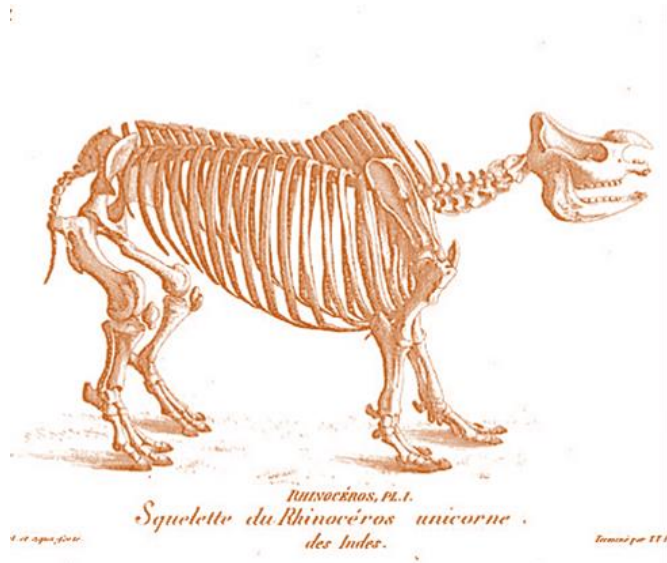


Fig.63: Sección de un esqueleto de rinoceronte,
Fuente: George Cuvier "Buscar en los huesos
fósiles de los cuadrúpedos" Vol. 2 (1812 –
2015).Tapa

Por medio de su análisis de la arquitectura gótica, Viollet-le-Duc descubrió otro principio propio de las formas de la naturaleza: el principio de correspondencia entre la forma y la estructura llegando a la conclusión de que tanto en Roma como en Grecia la forma coincidía con la estructura por lo cual su arquitectura tenía estilo.

A partir de estas reflexiones, Viollet-le-Duc intentó explicar la razón de la existencia de diversas formas o "estilos". A diferencia de este, Gottfried Semper (1803 – 1879) invocó explícitamente el método de Cuvier, interpretando el hecho arquitectónico como un conjunto de elementos con funciones específicas

Tanto Viollet-le-Duc como Semper, partiendo de la biología, llegaron a conclusiones distintas, aunque sus teorías fueron invalidadas por suponer un rechazo a las tipologías clásicas basadas en el orden y la proporción.

Según Joseph Montaner (1997), en el siglo XIX, aparece por primera vez la noción de tipo dentro de la cultura académica francesa. En 1832, Quatremère de Quincy en su "Diccionario histórico de la Arquitectura"⁸ establece una diferenciación conceptual entre

⁸ Quatremère de Quincy (1832) "Diccionario de Arquitectura". Ed. Nobuko. Trad. Fernando Aliata y Claudia Smidt. 1985

tipo y modelo; el tipo es la idea genérica, platónica, arquetípica, es la forma básica común de la arquitectura; modelo es aquello que puede ir repitiéndose tal cual.

La palabra *tipología* en la teoría arquitectónica neoclásica buscó objetivamente reestablecer y hacer vivir los tipos de los edificios antiguos. Argán relacionó ‘el tipo’ con la arquitectura de composición. Es también en este siglo cuando apareció el concepto de espacio interior, como esencia de la arquitectura.

Basándose en los tratadistas de la época, se debe hacer referencia a los tres elementos que atraviesan a la arquitectura durante el siglo XIX: El concepto de composición, carácter y tipología.

Quatremère de Quincy en su Diccionario de Arquitectura afirmó:

La composición consiste en la acción de abarcar no sólo la idea general sino todos sus desarrollos, tanto en la búsqueda de los detalles, de sus conveniencias, de sus relaciones con el todo, como en los medios que deben asegurar la ejecución del todo y de sus partes. (1832, p. 428).

El “carácter” en la arquitectura significa que el edificio debe expresar una específica intención representativa o funcional. Esto fue teorizado a través de la llamada “arquitectura parlante”, el edificio ‘nos dice’ de qué se trata.

Así como en un primer momento, en biología, se estudió la incidencia de la función en la evolución de la forma; en arquitectura, se hará sentir la incidencia de la forma en el funcionalismo estructural, para luego extenderse el concepto de función al espacio.

Sullivan y Wright, evidenciaron su coincidencia con las teorías de Cuvier. Louis Henry Sullivan (1856-1924) expresó que “la forma sigue a la función”; mientras que Mies afirmó que forma es función.

En 1896, Sullivan refiere a las características que debe cumplir un edificio en altura, respondiendo a la función, oficinas: *The Tall Office Building Artistically Considered* (“El edificio alto de oficinas considerado artísticamente”) publicado en 2012 en Stream. En este escrito, utilizando el concepto de analogía funcional biológica, fundamentó la tipología de rascacielos. En “Charlas de jardín” estableció una serie de relaciones entre

naturaleza y estructura, función, crecimiento, desarrollo y forma. Esta tendencia tendría gran repercusión en el siglo XX.

EL ESPACIO DE LA ARQUITECTURA DE HIERRO Y VIDRIO

La sociedad industrial exigió espacios que satisficieran las nuevas necesidades que se había generado. Para ello se contó con nuevas tecnologías que vendrían de la mano de los ingenieros, que no presentaban demasiada preocupación por los desarrollos teóricos que afectaban a la arquitectura.

Los nuevos edificios: mercados, estaciones de ferrocarril, exposiciones, escuelas, hospitales, etc., tuvieron al hierro como principal material; éste adquirió protagonismo gracias a su versatilidad y a su adecuación a las demandas de infraestructura, espacios amplios y diáfanos, grandes luces, etc.

El primer edificio construido por Paxton, enteramente con hierro y vidrio fue el *Crystal Palace* de 1851 en Londres, para albergar la Gran Exposición de los trabajos de la Industria de todas las naciones. El edificio en sí constituía una exposición de las nuevas tecnologías.

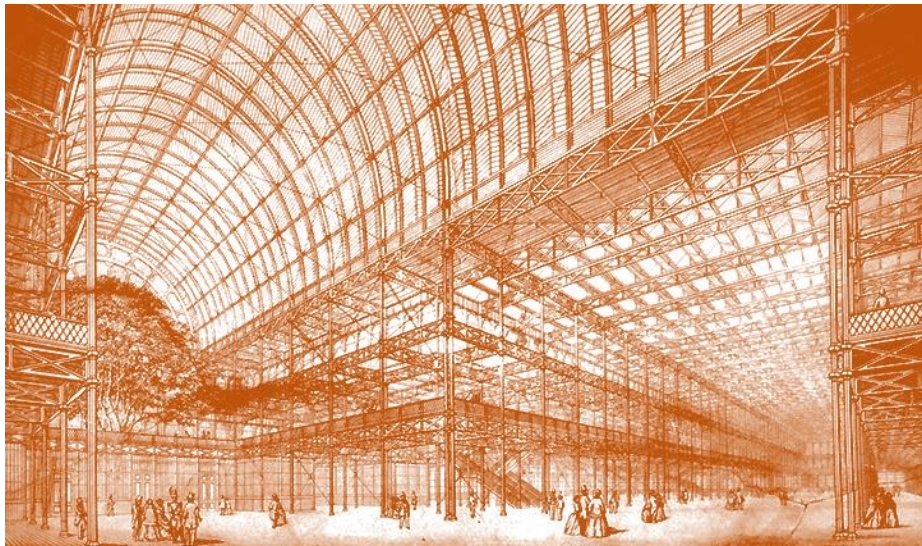


Fig.64: Interior del Palacio de Cristal.

Fuente: <https://spa.architecturaldesignschool.com/ad-classics-crystal-palace-17143>

Según Montaner, “(...) la percepción del interior del *Crystal Palace* de Joseph Paxton ofrecía incipientemente la visión de un espacio dinámico y libre, con los objetos totalmente bañados de luz, donde la barrera entre el exterior y el interior quedaba franqueada” (Montaner, 1997, p. 20).

ANTONI GAUDÍ (1852-1926): ESPACIO Y RESOLUCIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE LA MATERIALIZACIÓN DE CÓNICAS Y CUÁDRICAS

Gaudí, asentó sus procesos constructivos en la naturaleza y el dominio de la geometría espacial, sacando el máximo provecho de las formas tradicionales, asegurando la estabilidad de los edificios y logrando una estética propia. De escasa formación fisicomatemática en comparación con los ingenieros de la época, basaba sus estudios en maquetas a escala de los problemas a resolver.

Las superficies cuádricas utilizadas por Gaudí, con secciones hiperbólicas, parabólicas y elípticas, fueron generadas geoméricamente, por cónicas, por la geometría de escuadra y compás, únicas herramientas disponibles en ese entonces. La propiedad de estas superficies es que su materialización arquitectónica fue posible mediante la utilización de rectas alabeadas y, por añadidura, presentaría cualidades estructurales, acústicas y de difusión de la luz.

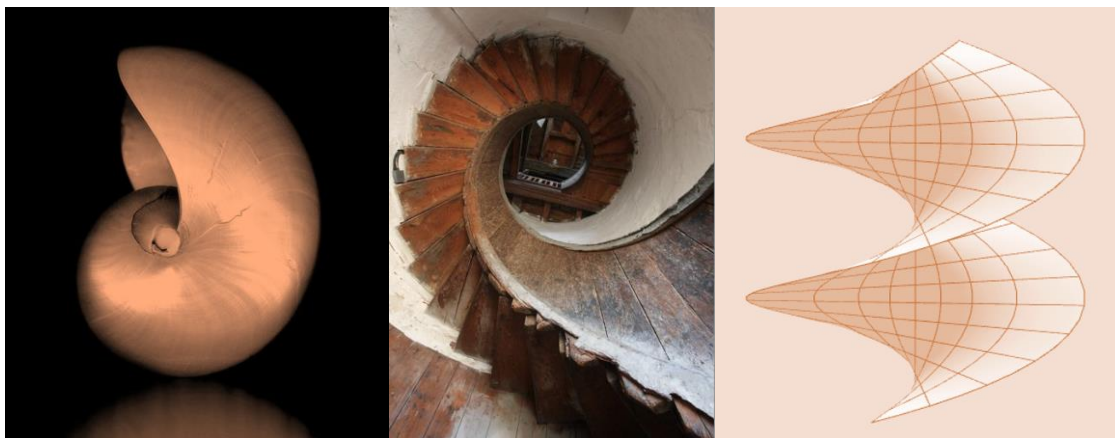


Fig. 65: Helicoide. Naturaleza – Arquitectura – Geometría
Fuente: Archivo, fotografía y diagrama personales

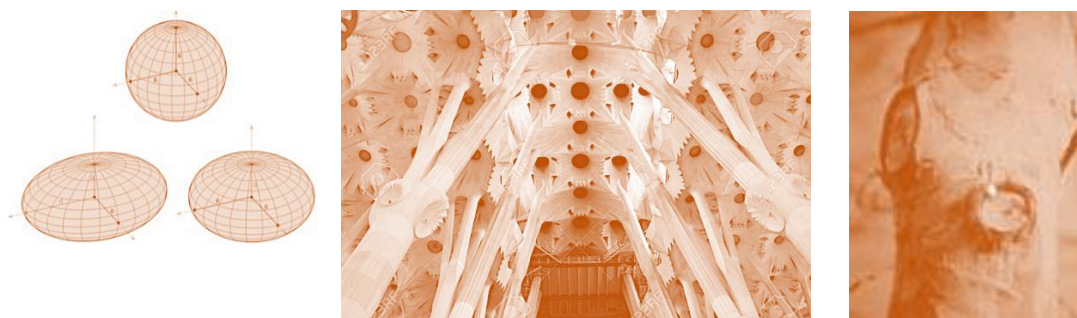


Fig. 66. Elipsoides, capiteles y elementos de la naturaleza inspiradores de Gaudí.
Fuente: https://es.123rf.com/photo_5431561_columnas-y-techo-interior-iglesia-de-sagrada-familia-de-antonio-gaud%C3%AD-en-barcelona-esp%C3%B1a-.html

Para conseguir más estabilidad y un efecto estético más estilizado, concibió todas las columnas ramificadas como columnas de doble giro, formadas por dos columnas. En la cúpula de la “Sagrada Familia” utiliza la intersección de paraboloides.



Fig.67: Cúpula de la Sagrada Familia.

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/eltiocachi/6650269699>

Según Gaudí, los contrafuertes del gótico eran muletas en los edificios y por ello lo substituyó por catenarias invertidas, forma óptima de transmisión de esfuerzos utilizada por la naturaleza



Fig. 68: Maqueta funicular de la Sagrada Familia

Fig. 69: Catenaria

Fuente: <https://elisavaee.wordpress.com/2009/10/13/la-maqueta-funicular/>

Para Gaudí, la naturaleza muestra las formas más idóneas para la construcción y algunas de las cuales pueden concretarse como formas geométricas regladas, tal el caso del paraboloides hiperbólico, el hiperboloide, el conoide y el helicoide.

I.8. PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX, ORGANINICISMO Y RACIONALIDAD

CONTEXTUALIZACIÓN

Los desarrollos filosóficos y científicos, entre otros acontecimientos, sucedidos en el siglo XX condujeron al cuestionamiento y replanteo del orden establecido, desembocando en el *Paradigma de la Complejidad*, mientras que, en las dos últimas décadas de ese siglo, la arquitectura puso sobre la palestra las incapacidades y contradicciones del sistema, en concordancia con las teorías de Derrida y las posturas científicas no deterministas. Estas posturas científicas atacaron paulatinamente la geometría euclidiana y la física newtoniana. Siendo la arquitectura gran consumidora de las lógicas mencionadas, se verá ampliamente afectada y mostrará al mundo la ruptura con el paradigma que las tuvo por estandartes.

El tema de determinados desarrollos científicos del siglo XX y la incidencia de éstos en la arquitectura, se desarrollará en los apartados correspondientes a “Deconstructivismo” y “Complejidad” debiendo abandonar la linealidad histórica hasta ahora atendida en esta tesis.

Los grandes adelantos tecnológicos del siglo XX, junto con el sistema de producción en serie, provocó una revolución en los ámbitos de la industria que serán cuestionados por la Teoría de la Complejidad teniendo como aliados, las nuevas teorías físico – matemáticas, los conceptos de resiliencia y sustentabilidad con el cuidado del medio ambiente siendo el ser humano parte de él.

Hechos de la primera mitad del siglo XX, sociales y tecnológicos, que condujeron a un cambio en la cosmovisión del ser humano llevándolo a la complejidad fueron, entre otros, una Europa asolada por dos guerras, el holocausto, el comienzo de un nuevo rol de la mujer en la sociedad y avances tecnológicos entre los que se encuentra la Máquina de Turing.

En Arquitectura, la ruptura con lo convencional quedó expresado en el cambio de la tipología de vivienda donde se operó un alejamiento de la planta central y simétrica con un vestíbulo de distribución y se incluyó la variable tiempo, cumpliendo con las necesidades de la vivienda en la nueva sociedad. No debemos olvidar que, a comienzos

del siglo XX, las vanguardias artísticas introdujeron la noción de espacio-tiempo, en correspondencia con las teorías de Einstein y la erradicación de los elementos representativos del pasado.

En las vanguardias, la concepción de espacio se basaba en una libertad que permitía pensarlo a través de la fluidez, ligereza, continuidad, apertura, infinitud. Un espacio que se transparentó de manera abstracta en total contraposición con el espacio tradicional que es diferenciado volumétricamente, de forma identificable, discontinuo, delimitado específico, cartesiano y estático. Todo ello culminará en la concepción internacional del espacio conformado sobre un plano horizontal libre con fachada transparente.

En el siglo XX, se abandonó la defensa de los estilos de la tradición clásica como forma de justificación de la arquitectura. La teoría biológica por la cual se vincula forma – función, va a fundamentar la relación, forma, función, estructura y Organicismo.

Incidencia de la geometría en el organicismo y la morfología.

D'Arcy Thompson (1860 – 1948) publicó en 1917 *On Growth and Form* (“Sobre el crecimiento y la forma”). Allí sostuvo que las formas de la naturaleza se podrían entender en términos matemáticos a través de la física, en cierta forma, para contrarrestar la postura de Darwin tan difundidas en la época.

Los términos Crecimiento y Forma que constituyen el título de este libro, deben entenderse en su relación con el estudio de los organismos. “Queremos ver cómo, al menos en algunos casos, las formas de los seres vivos y sus partes pueden explicarse bajo consideraciones físicas y queremos comprender que en general no existe ninguna forma orgánica excepto aquellas que están de acuerdo con las leyes físicas y matemáticas.” (D'Arcy Thompson, 1980, p. 9).

Estableció una relación entre la función de “los huesos y tendones”, con el uso de la “piedra y el acero en la construcción”. El diseño de las obras de ingeniería podía entonces seguir los mismos principios de las estructuras. Son los puentes victorianos, cuyas estructuras se encuentran constituidas por cables de acero que cuelgan de pilastras de mampostería, las que brindan a Thompson la analogía que buscaba con las estructuras de los seres vivos.

Para D'Arcy Thompson, la forma de un objeto es un diagrama de fuerzas siendo éstas responsable de la conformación del organismo, respondiendo a la necesidad del

desplazamiento provocando la simetría bilateral en la morfología de los organismos vivos vertebrados. Las fuerzas verticales gravitatorias y las horizontales de desplazamiento, son absorbidas por los huesos y el sistema muscular. Es decir, se pasa de una consideración estática de la forma a un entendimiento dinámico de las fuerzas que la originan.

La nueva mirada sobre la biología tendrá una gran influencia en el campo arquitectónico, haciéndose sentir en primera instancia en el área de la ingeniería con la búsqueda de la optimización y la eficiencia de las estructuras para luego instalarse en la arquitectura en general.

En la línea de Thompson, ya en la primera mitad del siglo XX, George Robert Le Ricolais (1894 – 1977) realiza importantes estudios de la forma en la naturaleza, relacionando estructura, topología, geometría y arquitectura.

Los estudios de Thompson y Le Ricolais serán de gran importancia en el estudio de la morfología y la morfogénesis.

FRANK LLOYD WRIGHT (1867 – 1959): ORGANICISMO ESPACIAL

Discípulo de Sullivan, Frank Lloyd Wright (1867-1959) asumiendo la noción de forma como organismo viviente, se valió del concepto de lo orgánico en un sentido amplio. Su concepción de orgánico incluye propiedades de unidad, totalidad e integración,

Según Wright (1961), en lo que concierne al edificio, manifestó que la unidad orgánica abarca el uso de materiales locales, de formas naturales, la posibilidad de crecimiento de las formas, la integración del artista con la obra, la unidad entre forma y función, entre arquitectura, lugar, paisajismo, estructura, amueblamiento, decoración.

Sus edificios se organizaron desde el interior hacia el exterior, hasta el punto de romper el volumen, lo que significaba un tipo de rechazo a la construcción tradicional basada en habitaciones cerradas sobre un plano central y simétrico envuelto en un volumen compacto (derivado modelo palladiano).

De esta forma, la simetría y proporciones de la villa palladiana no tenía lugar en sus planteos. El método compositivo de Wright - en su primera época y en términos muy generales- consistió en organizar formas simétricas agrupadas asimétricamente, esto quedará de manifiesto en la casa Robie.

Wright inauguró un lenguaje rupturista para el diseño de las casas estadounidenses de principios de siglo XX compatibilizando la naturaleza con la vida moderna y urbana, al tiempo que fue el espacio habitable el que se adaptó a las personas y no viceversa. Wright propuso construir espacios para ser vividos. Dentro del conjunto de las Casas de la Pradera, encontramos la Casa Robie, en ella Wright estableció la definición y diferenciación de espacios mediante divisiones de material ligero o techos de altura diferente en vez de cerramientos sólidos. Una marcada horizontalidad define al proyecto que, según Wright, fue inspirada por las amplias praderas que rodeaban al paisaje de Chicago.



Fig. 70: Casa Robie
Fuente: Norberg Shultz, p. 184.

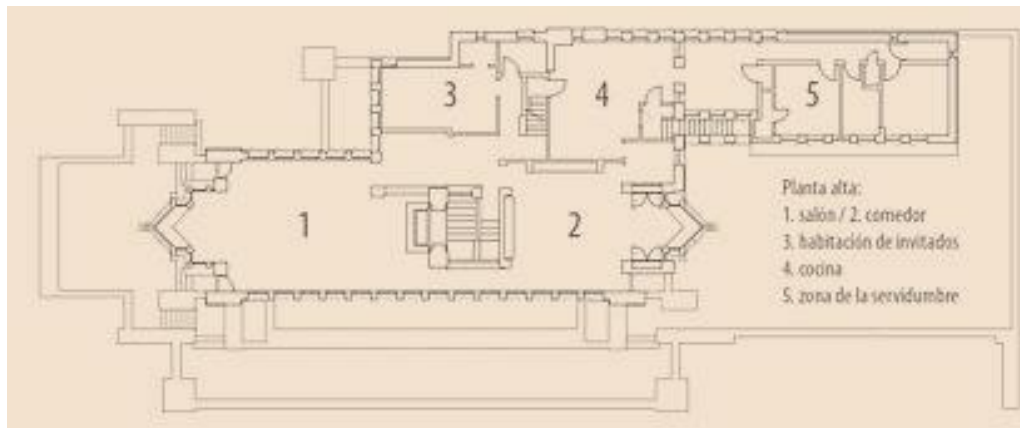


Fig. 71: Planta Casa Robie.
Fuente: Norberg Shultz, p. 184.



Fig. 72: Plantas Fallingwater (1936), Frank Lloyd Wright.
 Fuente: Art Resource, N. 2012. The Frank Lloyd Wright Foundation, Scorrssdale, AZ/Arizona

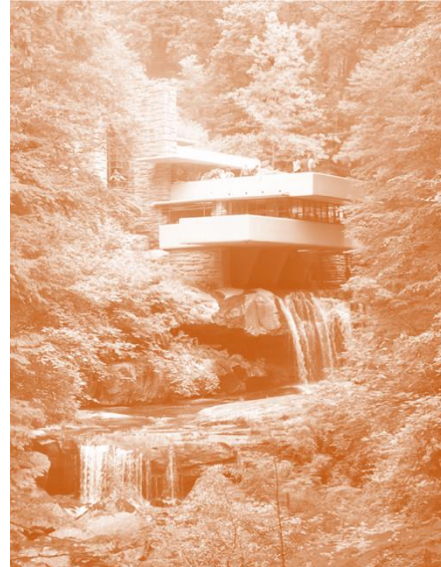


Fig. 73: PH Fallingwater (1936), Frank Lloyd Wright.
 Fuente: Art Resource, N. 2012. The Frank Lloyd Wright Foundation, Scorrssdale, AZ/Arizona



Fig. 74: Frank Lloyd Wright. Kaufman House, Pennsylvania.
 Fuente: Art Resource, N. 2012. The Frank Lloyd Wright Foundation, Scorrssdale, AZ/Arizona

En el planteo de la Casa de la Cascada, logra que gran parte de la casa esté en voladizo, situado encima del arroyo. Existe allí una identificación mutua entre la casa y su entorno.

El lenguaje organicista de Wright incluye una importante impronta geométrica, mediante la cual relaciona el entorno con la obra y la estructuración de las necesidades funcionales de la misma. La historia y la naturaleza constituían los argumentos decisivos de su idea del proyecto y de la arquitectura y, a pesar de la utilización de la geometría, sus edificios se alejan de las preocupaciones racionalistas de los arquitectos europeos.

En *Unity Temple*, el módulo organiza el espacio y la estructura en el todo y en cada una de sus partes. Pero esta retícula no quedó establecida por la definición de una estructura puntual.

Los muros perimetrales y los pilares, que distinguen diferentes tipos de espacios, son partes del soporte del edificio, contrariamente a la utilización de soportes puntuales de los arquitectos de su época.

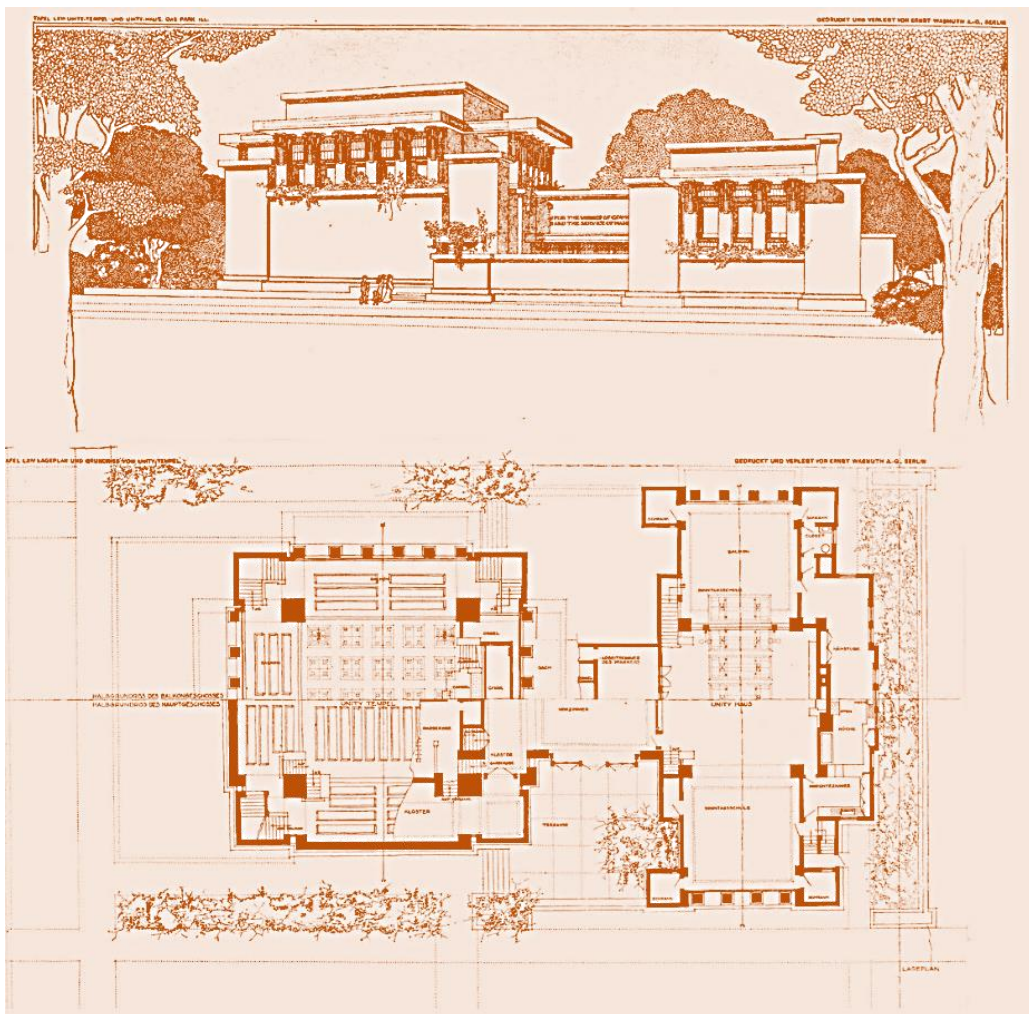


Fig. 75: Frank Lloyd Wright, Unity Temple, 1905.

Fuente: © 2011 Frank Lloyd Wright Foundation / Artists Rights Society (ARS), New York.

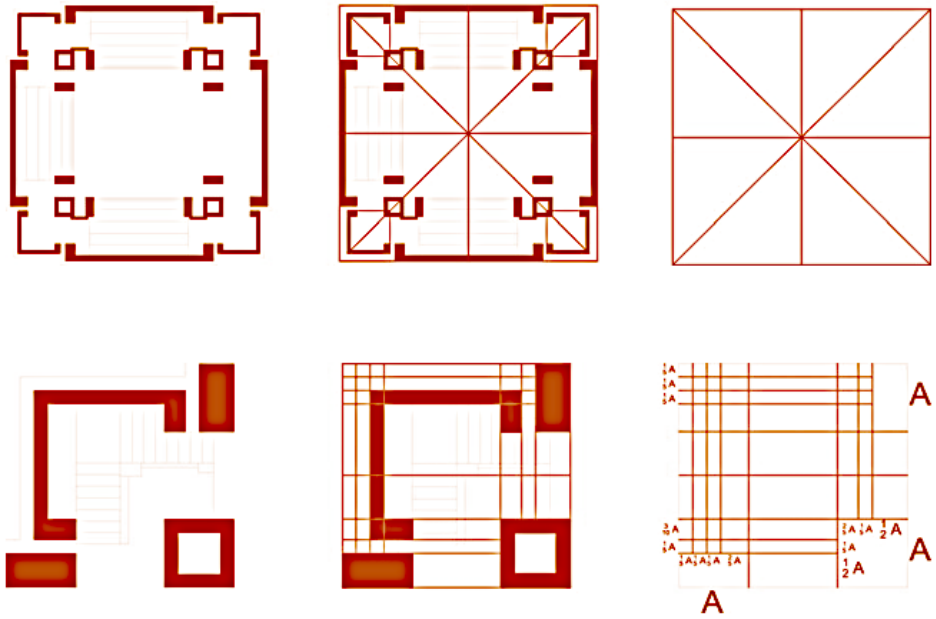


Fig.76: Trama, estructura y composición en planta y vitreou.

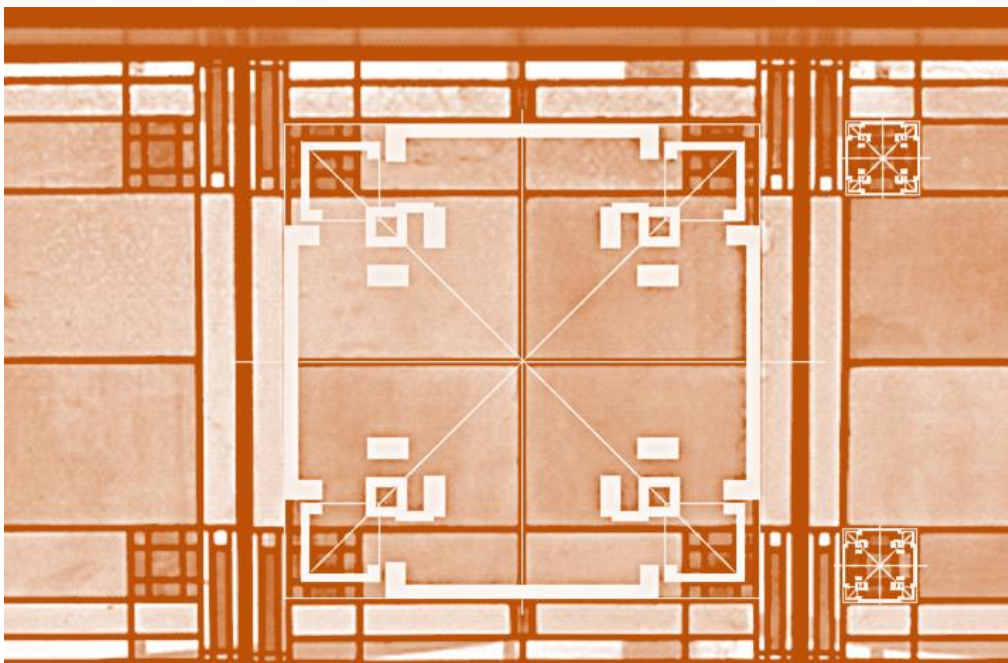


Fig.76: Trama, estructura y composición en vitreou.

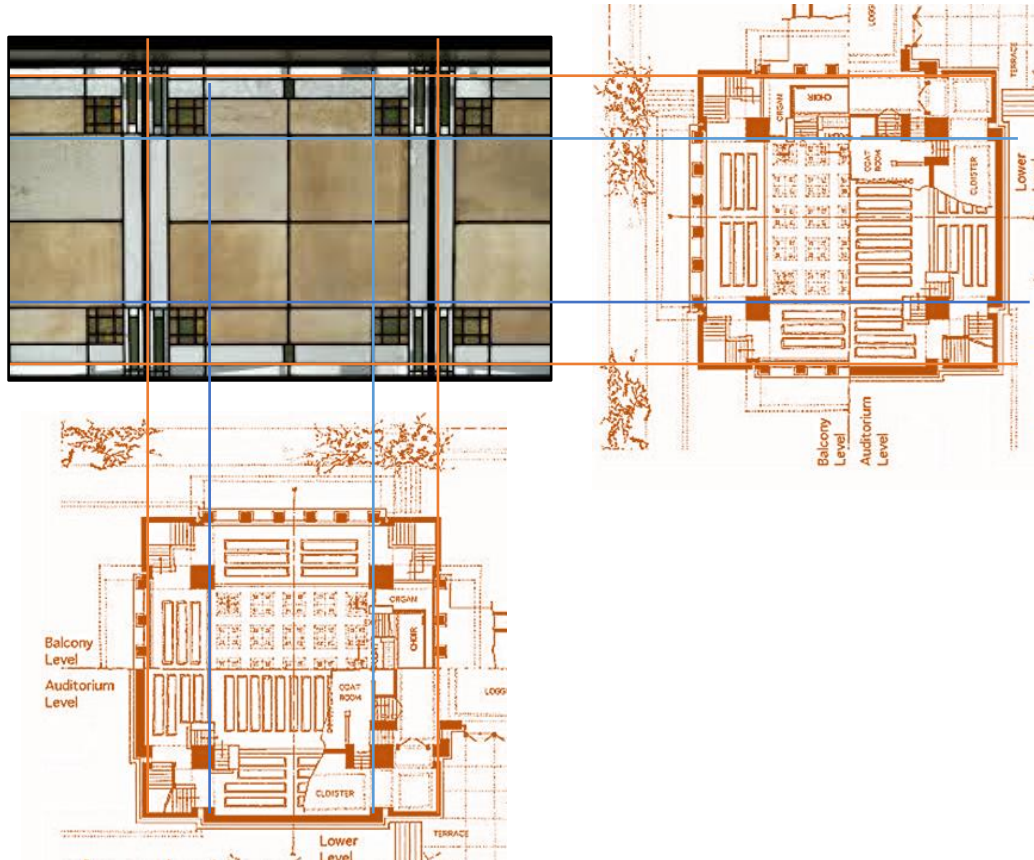


Fig.77: Utilización de retículas en tabiques en concordancia con la planta
Fuente: Elaboración propia de relaciones geométricas de distintos elementos de la construcción propia sobre fotografía.

En síntesis, se podría decir que la analogía biológica, dio lugar a dos perspectivas arquitectónicas: por un lado, la funcionalidad estructural, siguiendo los pasos Labrouste, Viollet-le-Duc; y por el otro lado, la formal-espacial, con fundamentos en Sullivan, seguido por Wright. Vale aclarar que, en esta última postura, existe un funcionalismo que no se adapta al racionalismo, por más que eche mano de la geometría

ARQUITECTURA MODERNA

Luego de la Primera Guerra Mundial hace su aparición en Europa el racionalismo arquitectónico, generando una nueva estética en base al uso de determinados materiales y el rechazo a la ornamentación.

En general, en las obras propias de la Arquitectura moderna, encontramos el predominio de los conceptos de estructura y función, el uso de geometrías euclidianas y una concepción dinámica del espacio. La forma debía deducirse del análisis de las funciones y la elección de las técnicas constructivas más adecuadas, libre de cualquier componente emocional y estético o aparato decorativo. En el proyecto resultaba fundamental la

utilización de la geometría como ordenadora del diseño y el cálculo para la concreción, ambos eran buenos instrumentos para lograr sus objetivos.

Bauhaus, geometría, técnica y racionalidad.

La Gran guerra acontecida entre 1914 – 1918 en Europa occidental, puso en crisis el anterior sistema de valores: la cultura socialista y democrática, las corrientes anticonformistas y de vanguardia en arte y en literatura que coincidían en el plano político con las corrientes más progresivas, saludaron la llegada de la República de Weimar ya que llevó adelante la democratización de la sociedad alemana. Es precisamente en este contexto político cultural, en el que la cultura académica que encuentra un fértil terreno de experimentación en dicha República.

Para intentar comprender qué lugar ocupó la experiencia de la Bauhaus, es necesario apelar a los rasgos sobresalientes de su desarrollo. En relación a nuestro objeto de estudio, la concepción total del arquitecto que tuvo Walter Gropius -arquitecto y al mismo tiempo, urbanista, sociólogo, historiador- representaba un elemento de novedad y de ruptura, en la concepción que sostenía la división del trabajo y las características del régimen capitalista (propiedad de la tierra y beneficio para el empresario).

En el contexto de la primera postguerra mundial en Europa, en donde se verifica una aguda crisis habitacional, se buscan nuevos tipos de alojamiento, en un intento por conseguir unas adecuaciones esenciales con parámetros económicos mínimos.

Como fruto de la elaboración teórica de esta noción, emerge una idea de *existenzminimum*. Esta idea o representación apunta a una referencia proyectual (viviendas populares modernas) con un significado expresamente desarrollado: optimizar la inversión social en unidades de vivienda adecuadas realizadas en óptimas condiciones económicas, en términos de eficacia, eficiencia y rapidez. Se apuntó a la reducción de áreas y volúmenes construidos, a la búsqueda de procedimientos constructivos expeditivos y a la reducción de costos.

Dentro de este contexto, Gropius funda la Bauhaus y la traslada a Dessau en Berlín en 1925 y se disolverá en 1933. A modo identificatorio, la escuela adoptó el principio “la forma sigue a la función”, que se mantuvo en el tiempo. Con base en la aplicación de un diseño funcional, desarrolló diversas especialidades relacionadas con el mundo del arte tales como diseño, artesanía, arquitectura y fotografía.

A fin de trasladar la Bauhaus de Weimar a Dessau, Gropius diseñó un edificio que presentaría condiciones óptimas de trabajo y con el tiempo resultaría icónico para la Arquitectura moderna. Haciendo uso de los materiales ya corrientes en el mercado, como el hormigón armado y la carpintería de herrería (de origen industrial) generó volúmenes puros articulados entre sí, al mismo tiempo que en su configuración espacial, adquirió relevancia el diálogo entre interior y exterior permitido por la tecnología y la resolución estructural.

Quizás, el paso de la Bauhaus a Dessau haya señalado, en cierto sentido, el compromiso de Gropius y sus colaboradores con la sociedad, significando el período de más intenso y fecunda de la actividad externa de la escuela.



Fig. 78: Maqueta de la Bauhaus.

Fuente: <https://bauhauseso.blogspot.com/2016/08/maqueta.html>



Fig. 79: Fotografía exterior de la Bauhaus

Fuente: <https://www.alamy.es/imagenes/externior-de-la-bauhaus.html>

A través de Lázló Moholy Nagy (1895 – 1946), la Bauhaus se pronunció respecto al espacio, sosteniendo que mediante la forma de los volúmenes se puede comprender la organización espacial.

Gyorgy Kepes (1906-2001), profesor de la Bauhaus, junto a Moholy Nagy sostuvo:

“El plano gráfico bidimensional ocupa el centro del campo espacial y cada unidad óptica parece avanzar o retroceder a partir de ella. A un punto, una línea o una forma en la superficie gráfica se los ve como provistos de cualidades espaciales.” (Kepes, 1969 [1944], p. 34).

GEOMETRÍA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX

La aspiración a un mundo mejor, el gusto por la provocación, el deseo de emancipación de la Academia, la búsqueda de un lenguaje común a las artes, posiblemente hayan sido factores que, a principios del siglo XX, condujeron al arte abstracto que ahondaría en el camino de la geometría.

Esta abstracción se verá reflejada en la arquitectura teniendo a la geometría como herramienta. Ejemplo de ello es Piet Mondrian con sus rectángulos áureos, el empleo de irracionales en el trazado de otros rectángulos y colores primarios en búsqueda de la esencia de la naturaleza. El correlato de esta postura en arquitectura se encuentra presente en la Casa Rietveld Schröder (1924) proyectada por Gerrit Rietveld y Truus Schröder-Schrader,

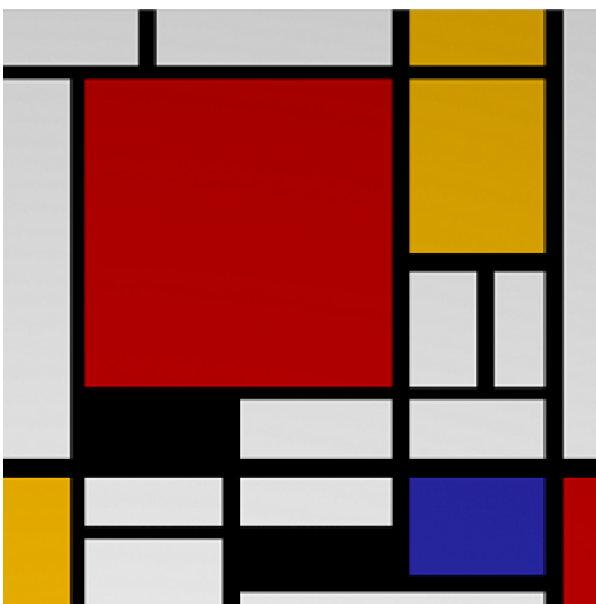


Fig. 80: Piet Mondrian.
Fuente: <https://niiod.es/las-10-obras-de-arte-mas-famosas-de-piet-mondrian/>



Fig. 81: Casa Rietveld Schröder (1924)
 Fuente: <http://www.m-arteyculturavisual.com/2017/04/14/ella-que-vivia-dentro-de-un-cuadro/>

MIES VAN DER ROHE (1886 -1965): ABSTRACCIÓN, GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y ESPACIO.

La composición geométrica, basada en las proporciones y la ausencia total de elementos ornamentales caracterizaron la obra de Mies, al igual que la sencillez de los elementos estructurales.

En el diseño de sus casas de campo, exploró el juego de volúmenes y planos rectos yuxtapuestos o cortados por amplios ventanales o con marquesinas sobre las puertas de acceso. Se ocupó de resaltar estos juegos geométricos, mediante el empleo que hizo de los materiales de concreción.

Podríamos decir que la arquitectura de Mies expresó la abstracción a través del uso de la geometría, los materiales y la estructura. En la Casa de Campo de Ladrillo (1923), en la que los muros aparecen como un juego abstracto de planos, discute el principio de Le Corbusier por el cual se debía construir con soportes de escasa sección.

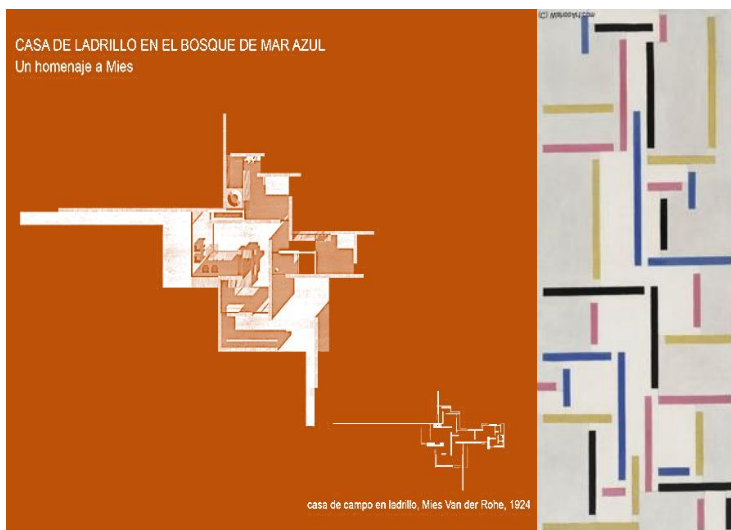


Fig. 82: Casa de Campo de Ladrillo.
 Fuente: <https://www.arquimaster.com.ar/galeria/obra/63.htn>

En dicha Casa, la composición del conjunto estaría basada en un nuevo concepto de la función del muro, donde el muro pasa a constituirse en el elemento de composición, en vez de la habitación cúbica, es decir, destruye la tradicional caja bajo techo. Las paredes son pantallas que no se interceptan. El espacio así generado es fluido y continuo, abriéndose al paisaje.

Estos muros independientes unidos por paños de vidrio crean una nueva e indefinida sensación del espacio. Los espacios articulados mediante planos libremente ubicados, alcanzarán su máxima expresión en el pabellón de Barcelona de 1929. En este caso, Mies eligió, por razones estructurales, utilizar ocho columnas para sostener el techo y vigas visibilizadas a efectos de conservar la sensación de un espacio neoplástico de planos puros.

En el Pabellón alemán de la Feria Internacional de Barcelona (1929) utilizó una retícula regular de ocho columnas en las que apoya el techo y lo separa del cerramiento, ello permitió la libertad en el uso de las paredes, tanto para lograr fluidez espacial, como para el uso estructural de las mismas, ya que a su vez intervienen en la configuración espacial.

La geometría utilizada por Mies es funcional a su abstracción: ordena el espacio, lo estructura y brinda ritmo a sus fachadas. Todo esto a base de proporciones.

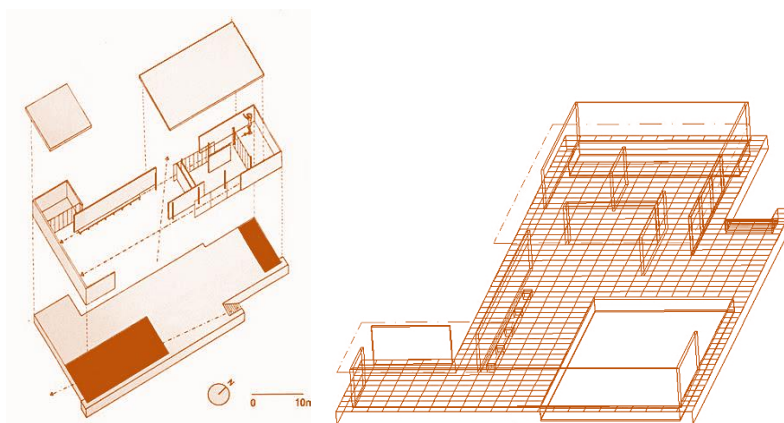


Fig. 84: Axonométrica despiece del Pabellón Alemán.
Fuente: <https://documentos.arq.com.mx/Detalles/28204.html>

LE CORBUSIER (1887 –1965): MECANISMOS GEOMÉTRICOS DE CONTROL: GEOMETRÍA Y PROPORCIONES EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL Y LA ESTRUCTURA

Entre los aportes fundamentales de Le Corbusier podemos considerar el concepto de vivienda como “máquina de habitar”:

“Hay un espíritu nuevo” que restablece la generación del decorado (Le Corbusier, 1978, p. 69), el maquinismo; contexto en el que expresa, “la casa es una máquina de habitar” (Le Corbusier, 1978, p. 73).

En concordancia con este concepto, establece el concepto de ciudad moderna como ciudad a la medida del hombre. Según Le Corbusier:

“... Es que la arquitectura y el urbanismo esperan hombres nuevos para estos tiempos nuevos...” (“Le Corbusier, 1972, p. 14). Habitar, para él implica: aprender a vivir mejor, es esencialmente el gusto por vivir (...) en busca de la alegría de vivir. (1976, p. 26),

Le Corbusier utiliza trazados geométricos para la composición y la disposición ordenada de la planta o el plan generador, introduciendo un mecanismo geométrico de control sobre el proyecto, mecanismo que en forma distinta ya había sido utilizado por el Renacimiento. Se valió de trazados reguladores geométricos para eludir la arbitrariedad y crear un sistema que abarque a cada una de las partes y la totalidad.

En sus obras aparecen estrategias utilizadas para ordenar el espacio. Dichas estrategias están constituidas por reglas matemáticas ordenadoras del espacio, tales como:

El ángulo recto
La sección áurea
Las mallas ortogonales
Ejes, ritmo y simetría

Mediante la utilización del ángulo recto, se genera un sistema de proporciones llegando a obtener un sistema modular a efectos de ordenar las relaciones entre los objetos y lo circundante, y utilizarlo como herramienta compositiva a efectos de situar los objetos en el plano. En su primera etapa, el ángulo recto será utilizado tanto en planta como en alzada.

En la *Maison Guiette*, Amberes, 1926, partiendo de un esquema estructural, desarrolló el trazado regulador del proyecto.



Fig. 85: Documentación Gráfica Maison Guiette, Amberes 1926. Fuente: <https://www.archweb.com/en/architectures/drawing/maison-guiette-2d-3d/>

Fig. 86: Fachada Maison Guiette, Amberes 1926. Fuente: <https://www.archweb.com/en/architectures/drawing/maison-guiette-2d-3d/>

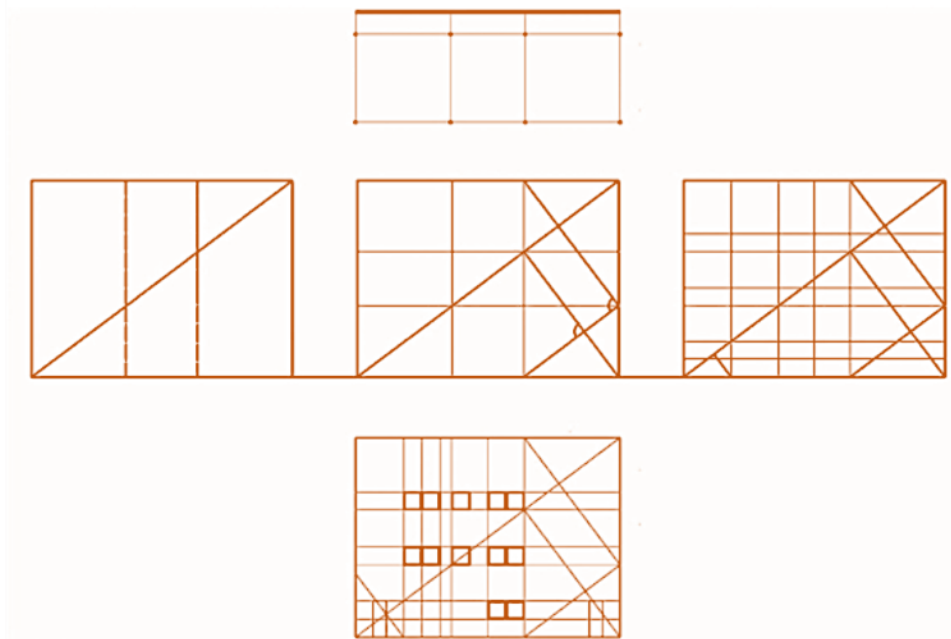


Fig. 87: Trazado geométrico de la fachada
Fuente: Larrumbe Machín (2015) “Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923-1933). Le Corbusier, 50 years later. International Congress. Universidad Politécnica de Valencia

El sistema de proporciones que rige el trazado regulador del proyecto se desarrolla a partir de su esquema estructural. La composición de las alzadas vendrá determinada por los ejes

de los pilares, ocultos tras el paramento de fachada, que dibujan líneas auxiliares verticales. El ángulo recto, por otra parte, no sólo regula la proporción del plano de fachada, sino que también dicta la proporción a la que han de ajustarse cada uno de sus huecos.

La sección áurea

Se podría decir que, entre las proporciones matemáticas, en los ámbitos del arte, la que goza históricamente de mayor prestigio es la proporción áurea a la que se la vinculó a la armonía y la belleza y posteriormente, se la buscó científicamente en los vegetales y seres vivos.

Adolf Zeising (1810 – 1876), en 1854 realizó su primera publicación: *Nueva teoría de las proporciones del cuerpo humano, desarrolladas a partir de una ley morfológica básica hasta ahora desconocida, y que está presente en toda la naturaleza y el arte*, acompañado por un resumen completo de los sistemas prevalentes, donde expuso su teoría de la proporción áurea en la naturaleza, el ser humano y el arte. Referido al cuerpo humano llegó a establecer que las partes consecutivas que consideró están en relación áurea. Divide la altura total del cuerpo del ser humano, de un hombre, en cuatro zonas: desde la cabeza al hombro, del hombro al ombligo, del ombligo a la rodilla, y de la rodilla a la planta del pie; cada zona se subdivide en cinco segmentos, que están dispuestos simétricamente dentro de cada zona.

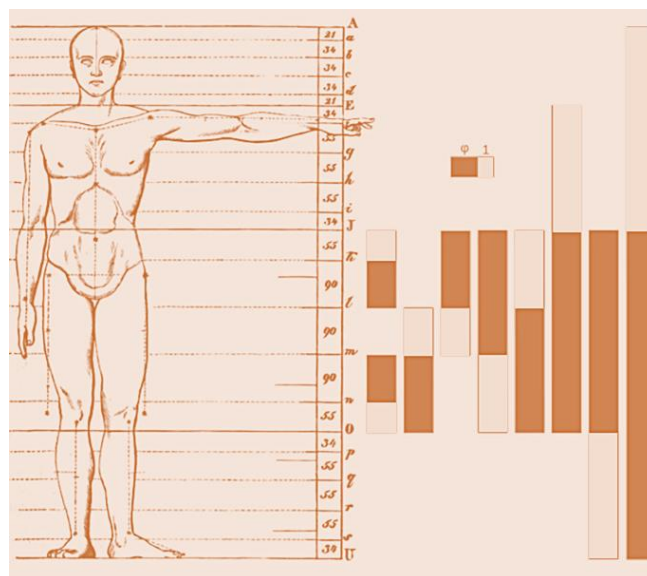


Fig. 88: Proporciones Aureas en el cuerpo humano halladas por Zeising.

Fuente: “Phi en el cuerpo humano” disponible en <https://www.sacred-geometry.es/?q=es/content/phi-en-el-cuerpo-humano>

Le Corbusier, como admirador de la matemática, no podía dejar de utilizar esta proporción, pero lo hizo, ya no con los fines enunciados anteriormente, sino para relacionar cada uno de los elementos de la obra con el todo, lo que le brindó una justificación racional a su desarrollo arquitectónico. Retomó la línea de Zeising, a efectos de dotar a la obra arquitectónica y a cada uno de sus componentes de un sistema a medida del ser humano.

Sus estudios referidos a la sección áurea lo llevaron a publicar en 1950 *El Modulor, ensayo sobre una medida armónica a la escala humana aplicable universalmente a la arquitectura y a la mecánica*, donde planteó dicho sistema de proporciones matemáticas basado en el número de oro.

Partiendo de la medida ideal de un ser humano con el brazo levantado: 226 cm. y de su mitad a la altura del ombligo (113 cm.), estableció dos series utilizando los números de Fibonacci, dividiendo o multiplicando las medidas elegidas por el número de oro.

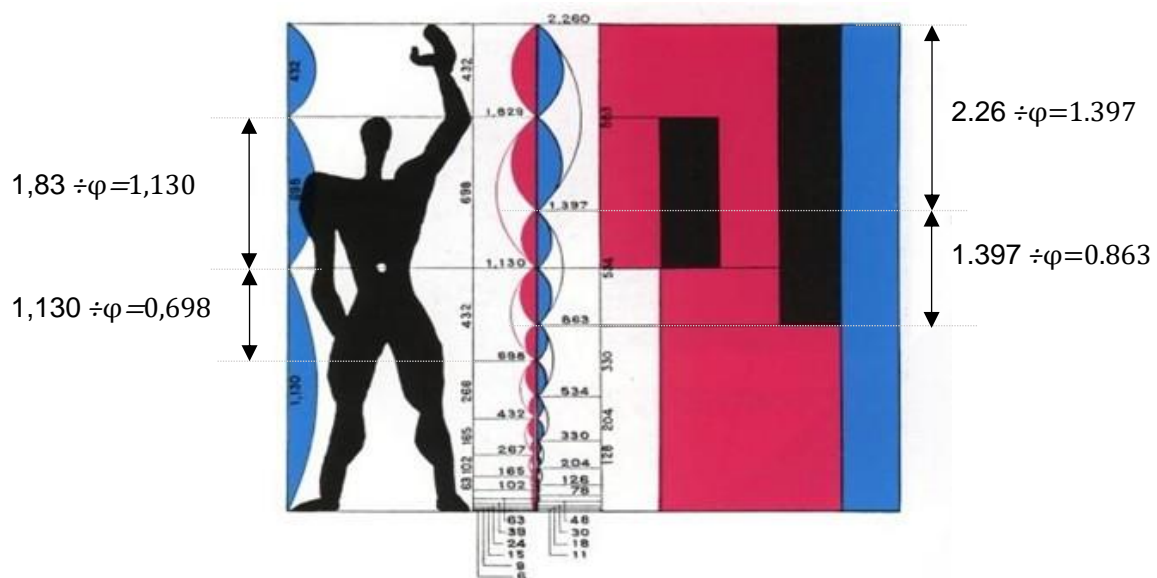


Fig. 89: Intervención sobre gráfico de Le Corbusier del Modulor.
Fuente: Elaboración propia sobre gráfico de Le Corbusier

En la figura se detalla cómo va estableciendo su serie roja y su serie azul. Serie azul, en metros, sería: ..., 9,57; 5,92; 3,66; **2,26**; 1,40; 0,86; 0,53; 0,33; 0,20; ...

Serie roja, en metros, sería: ..., 4,79; 2,96; **1,83**; 1,13; 0,70; 0,43; 0,26; 0,16; 0,10; ...

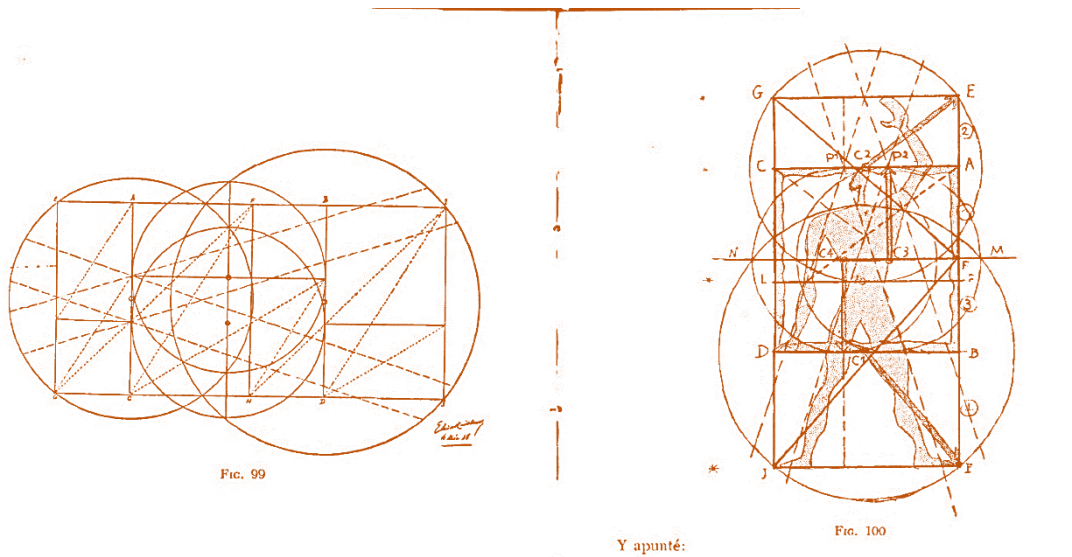


Fig. 92: Estudios realizados para el trazado del Modulor de Le Corbusier
Fuente: <http://onlybook.es/blog/el-modulor-de-le-corbusier/>

En la “Unidad Habitacional” (1947 – 1952) de Marsella, utilizando ambas series, determinó las medidas de las partes del edificio, mediante la aplicación de proporciones a los números especificados.

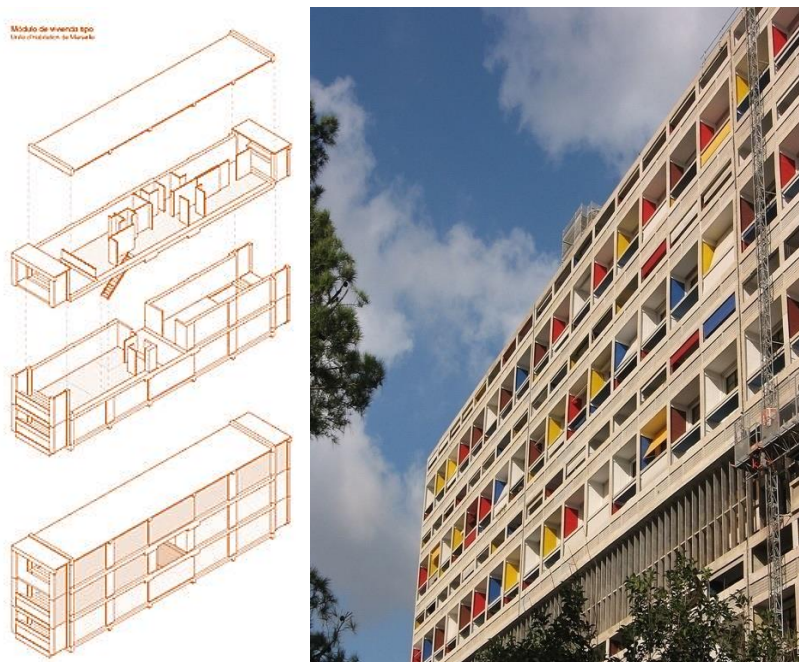


Fig. 93: Diagrama del módulo de vivienda y fachada Unidad Habitacional de Marsella.
Fuente: <https://faircompanies.com/articles/cite-radiouse-un-bloque-a-escala-humana-con-calles-interiores/>

Para Le Corbusier, los objetos utilizados por el ser humano, son prolongaciones del ser humano mismo, por lo cual la arquitectura debe obedecer a sus características físicas y en ellas se encuentra el modelo generado por él mediante el modulor y su sección áurea.

Las mallas ortogonales

Mientras que, en gran parte de sus textos, Le Corbusier cita continuamente diversos trazados reguladores como el ángulo recto, el eje o los sistemas de proporciones basados en la sección áurea; en su manifiesto hacia una nueva arquitectura, se refirió al empleo de la malla, al *orden ortogonal que necesariamente ha de regular los nuevos barrios de viviendas en serie*. Le Corbusier indicó que la aplicación de mallas ortogonales se da como estrategia geométrica de diseño. Se encuentra también una fuerte presencia de la malla ortogonal en la estructura subyacente de sus proyectos urbanos. En el complejo residencial de Pessac, unos ejes trazan las directrices generales del proyecto, poniendo en relación la intervención con el resto del territorio y establecen, a su vez, una jerarquía en las calles. En ese proyecto, colocó el modelo estándar de su vivienda mínima, sobre una malla a efectos de regular y unificar el conjunto, además de dibujar sobre ella las divisiones catastrales.

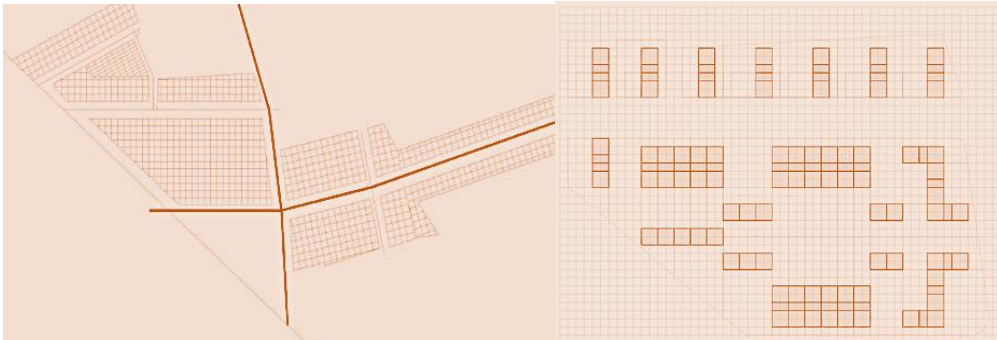


Fig. 94: Cité Frugés, Pessac, 1926. Complejo Urbano
Fuente: Fuente: Larrumbe Machin (2015)
“Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923- 1933). Le Corbusier, 50 years later. International Congress. Universidad Politécnica de Valencia.

Fig.95: Detalle de Manzana.
Fuente: Fuente: Larrumbe Machin (2015)
“Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923- 1933). Le Corbusier, 50 years later. International Congress. Universidad Politécnica de Valencia.

En *Complejo Urbano Cité Frugés* encontramos dos trazados reguladores delimitando mallas; estos elementos también aparecen en el proyecto de *Ciudad Jardín* y el *Plan Voisin*, ambas de 1925 y la *Ville Radieuse* de 1930.

Eje, simetría y ritmo.

Tal como lo manifestó Le Corbusier, en arquitectura es preciso que un eje tenga un objetivo. El eje es el que pone orden. Poner orden, es comenzar una obra.

Son varios los proyectos urbanísticos por él realizados, se distinguen tres funciones distintas adjudicadas al eje:

- Relacionar el proyecto con el territorio.
- Conectar las distintas partes del programa.
- Constituirse en instrumento de medida.

La primera de las funciones mencionadas, está presente en todos los proyectos de planificación urbana insertos en un entorno determinado, como el Plan Voisin o el plan para Buenos Aires.

Los ejes son utilizados como un elemento compositivo y aplicados a esquemas urbanos ideales, como la Ciudad Jardín o la *Ville Radieuse*. Para Le Corbusier, las ciudades deberían ser concebidas y trazadas en toda su extensión, como fueron trazados los templos de Oriente y como fueron ordenados los Inválidos o el Versalles de Luis XIV.

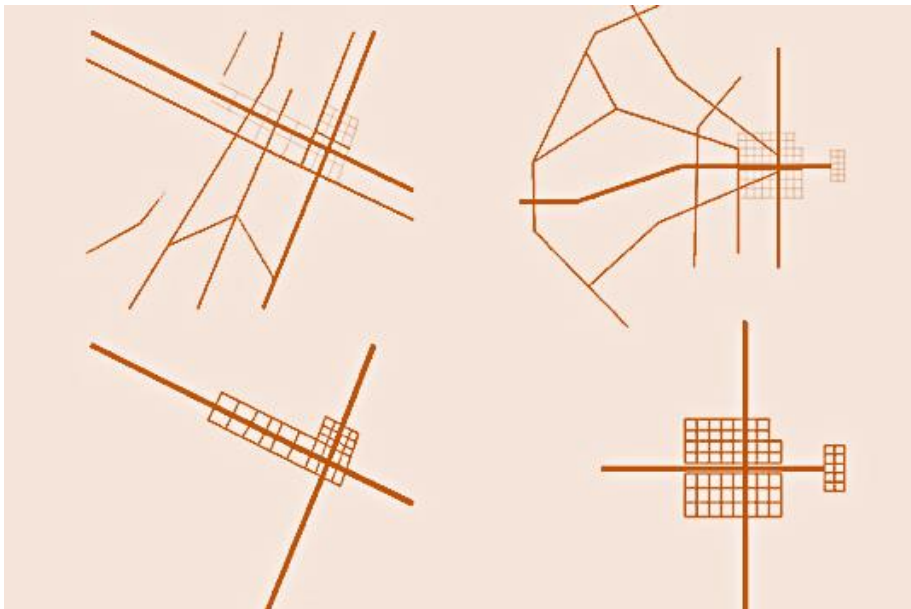


Fig. 96: Plan Voisin, Paris 1925
Fuente: Fuente: Larrumbe Machin (2015)
“Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923- 1933). Le Corbusier, 50 years later. International Congress. Universidad Politécnica de Valencia.

Fig. 97: Plan para Buenos Aires, Argentina, 1929.
Fuente: Fuente: Larrumbe Machin (2015)
“Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923- 1933). Le Corbusier, 50 years later. International Congress. Universidad Politécnica de Valencia.

Le Corbusier, al romper la caja muraria, proyectó el interior hacia el exterior, lo que acentuó concentrando las circulaciones en el centro y disponiendo de grandes aventanamientos que permiten ampliar la mirada hacia el exterior. Los interiores se construyen para contemplar el paisaje.

En su idea de espacio, son fundamentales los conceptos de ancho, alto y dirección, entendiendo al espacio como extensión medible, finita y recorrible (ejes cartesianos X, Y, Z) en ese recorrido incorporó el tiempo. Por más que introdujo el tiempo, en él subsiste una visión cartesiana del espacio, regida por la geometría euclidiana.

Estructura

Cuando en 1926, enunció “los cinco puntos de la arquitectura moderna”, en el primero de ellos refiere a la estructura, proponiendo la sustitución de los muros de carga por pilares de hormigón armados ordenados por una cuadrícula.

De esta forma, se liberó al muro de la función portante, mientras que la estructura conformando un esqueleto de vigas y columnas de hormigón, quedó separada de la envolvente. Es posible, por un lado, independizar el volumen exterior de la estructura y manejarlo geoméricamente, al mismo tiempo que permite, mediante la tabiquería, conformar un espacio interior con la libertad deseada, sin intervención de los elementos resistentes.

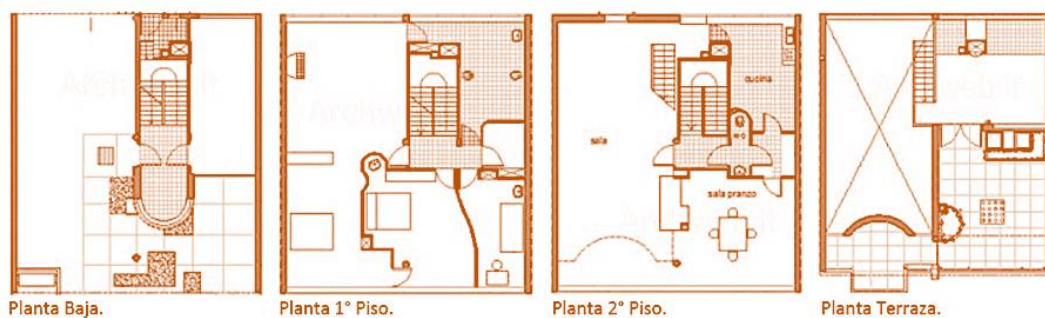


Fig. 98: Plantas casa Cook.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/887910/casa-cook-kos-hotel-mastrominas-architecture/5a4b0db1b22e38fc8d000082-casa-cook-kos-hotel-mastrominas-architecture-suite-floor-plan>



Fig. 99: Casa Cook.

Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/villa-cook/>

I.9. MEDIADOS DEL SIGLO XX: HACIA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE LA GEOMETRÍA Y LA BIOLOGÍA

CONTEXTUALIZACIÓN

Como ya se mencionó, en la primera mitad del siglo XX, Le Ricolais realizó importantes estudios de la forma en la naturaleza, relacionando estructura, topología, geometría y arquitectura. Le Ricolais le sumó al poder de observación de Thompson, el método analítico – matemático.

Mediante el estudio de la estructura interna de los huesos, determinó que ésta constituye una malla tridimensional con una geometría determinada, donde el secreto de la resistencia reside en la distribución de los vacíos y la relación entre ellos.

Consideraba que las formas naturales eran más eficientes -desde el punto de vista mecánico- que las construidas por el ser humano. Se dedicó a la observación de diversas estructuras y organismos en la naturaleza como los radiolarios⁹, los caparzones de los moluscos o los cristales minerales.

En 1934 publicó un estudio sobre la partición geométrica de la esfera y realiza una segunda investigación sobre las estructuras naturales de los radiolarios.

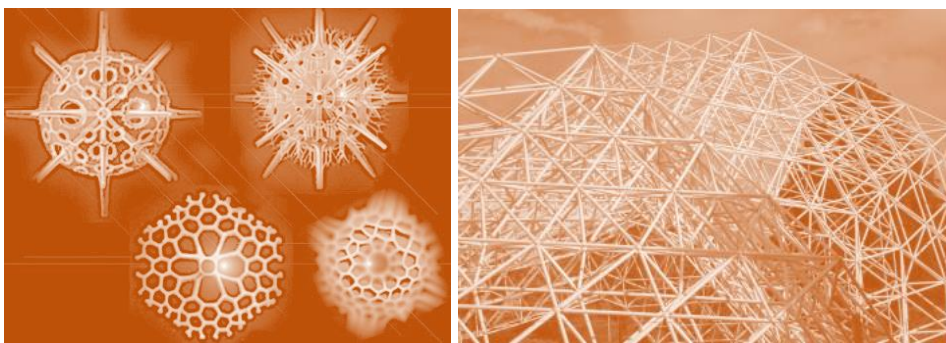


Fig. 100: Radiolarios

Fuente: <https://www.alamy.com/radiolarian-coloured-scanning-electron-micrograph-sem-of-the-shell-image69881979.html>

Fuente: Estereoestructura de componentes SEF <https://www.fapym.com/estereo-estructuras/sistema-sef/>.

⁹ Los radiolarios constituyen un grupo de protozoarios marinos rizópodos, es decir que se mueven por medio de seudópodos, que poseen un esqueleto perforado formado por sílice (Cfr. Thompson, 1945, pp. 708 - 716).

Ya en la década del '40, desarrolló una metodología de investigación que le permitió deducir principios constructivos y estructurales mediante la observación de estructuras naturales; principios que luego aplicaría a la construcción.

En 1940 publica *Essais sur des systèmes reticulés à trois dimensions*, a partir de ello las estructuras espaciales de barras aparecieron como un nuevo lenguaje arquitectónico. En su búsqueda de una configuración geométrica que permita establecer un modelo estructural, llega a diferenciar en los objetos dos zonas estructurales, un núcleo comprimido, compuesto por redes hexagonales formando poliedros y una superficie externa sometida a tracción.

Es decir, mediante una resolución geométrica llegó a establecer el equilibrio entre zonas comprimidas y traccionadas.

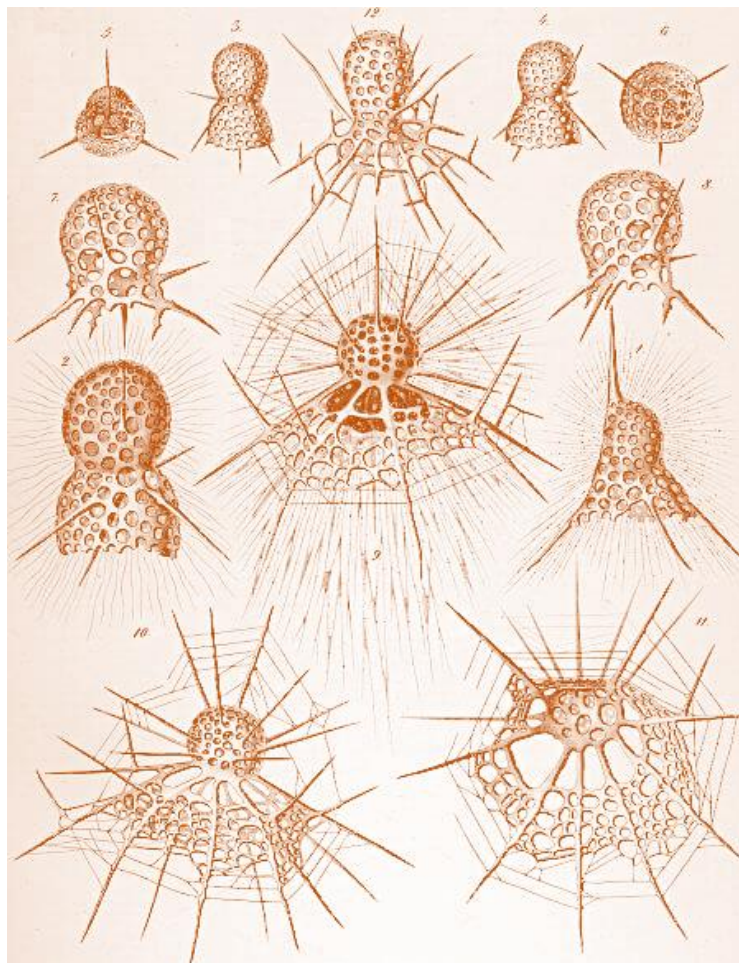


Fig.101: Especies de Radiolarios con esqueletos auto mórficos.

Fuente: Resonancia y campos mórficos. <https://www.sheldrake.org/espanol/resonancia-morfica-y-campos-morficos-una-introduccion>

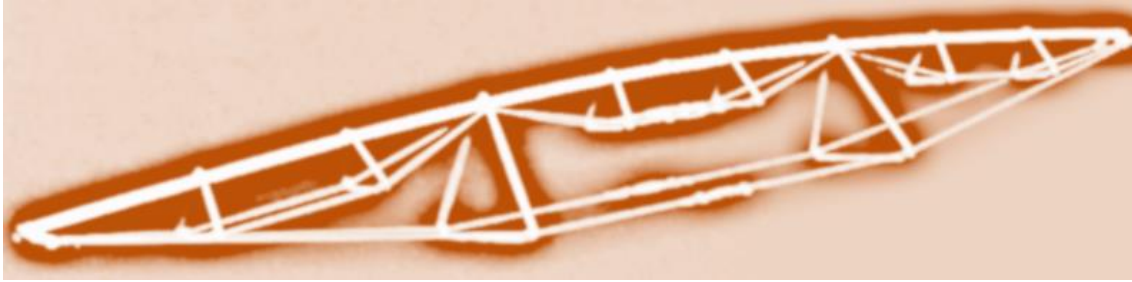


Fig.102: Diseño de viga auto mórfica Polyten (1968-1969).

Le Ricolais utilizó los conceptos: inercia, rigidez y triangulación, a efectos de determinar la geometría espacial de las estructuras en búsqueda de una mayor eficiencia. Esta geometría de la estructura puede definir espacios a distintas escalas según una jerarquía que recuerda la compleja organización geométrica de huecos interiores en las formas naturales.

RICHARD BUCKMINSTER FULLER (1917 – 1983)

Richard Buckminster Fuller habiendo desarrollado con anterioridad ideas sobre geometría energética, a fines de la década del '40 -a modo de aplicación de estas y buscando una rápida solución al problema de la vivienda-, desarrolló el domo geodésico.

Su construcción se basó en los principios de las *estructuras de tensegridad*¹⁰, que permiten montar estructuras simples asegurando su integridad, siendo extremadamente ligeras y estables. Los domos, estructuralmente se componen de una malla triangulada, capaz de responder en conjunto frente a una fuerza actuante en cualquiera de sus nodos.

¹⁰ Gómez-Jáuregui (2008) define la Tensegridad como un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados (habitualmente cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema).

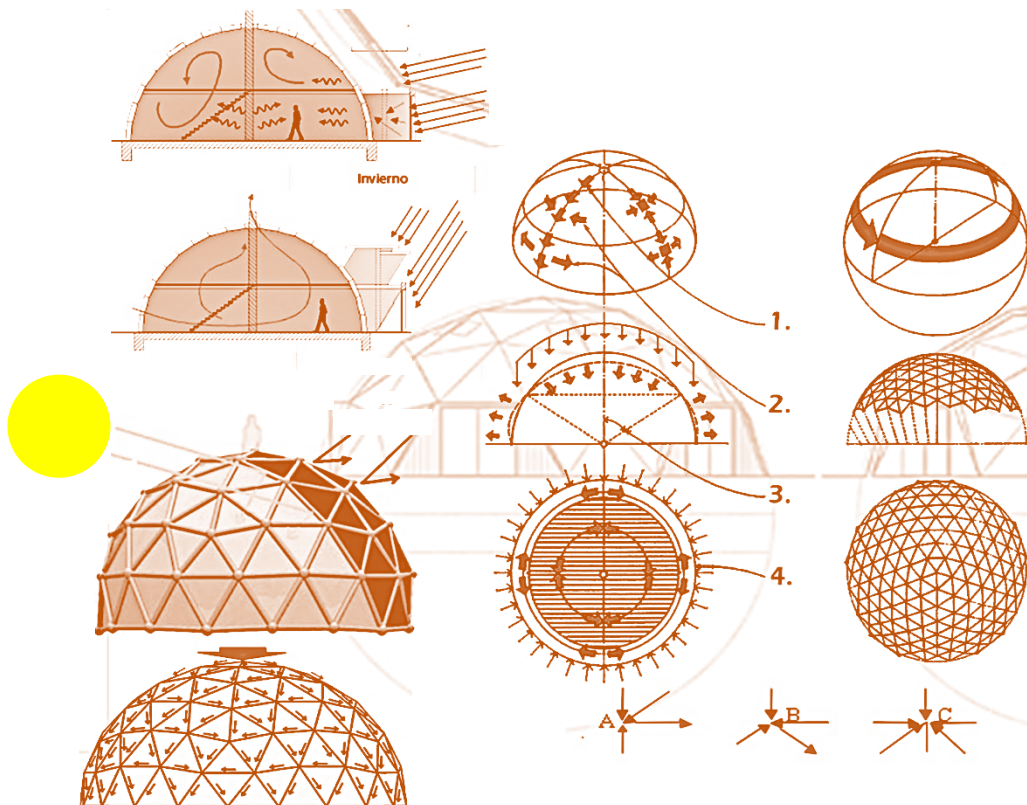


Fig. 103: Propiedades ambientales y estructurales de la geodésica de Fuller.
Fuente: Elaboración propia

El pabellón de los Estados Unidos para la “Exposición Universal de Montreal” de 1967 estaba conformado, al igual que la mayoría de los grandes domos construidos por Fuller, por unidades estructurales tridimensionales conformadas por triángulos exteriores conectados con hexágonos interiores, dispuestos en forma esférica.

La inercia geométrica que permitía que el domo fuera capaz de resistir los esfuerzos de flexión derivados de su forma circular era el *icosaedro*¹¹.

DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS DE BARRA

Las estructuras de barras que, gracias a sus vacíos, optimizan la cantidad de material utilizado distribuyendo los esfuerzos en compresión y tracción, no sólo atañen al hierro: El *Philadelphia City Tower* (1952-1957) diseñado por Louis Kahn (1901 – 1974) y Anne Tyng (1920 – 2011), de aproximadamente 180 metros de altura, estructuralmente, está trabajando como una viga empotrada en el terreno, recurriendo a la geometría tetraédrica

¹¹ El icosaedro es un volumen regular de veinte caras triangulares.

para alcanzar una excelente resistencia frente a las cargas horizontales de viento, al descomponer los esfuerzos de flexión en tracciones y compresiones.

La estructura principal se componía a partir de barras de hormigón que conforma tetraedros de menor altura que las barras; los tetraedros se ensamblan entre sí generando una grilla espacial. De esta forma, existe una jerarquía espacial que surge de la geometría estructural que incluye a los vacíos.

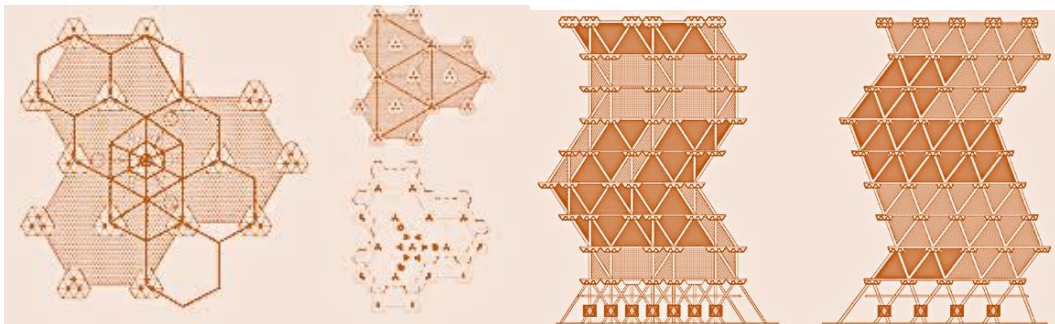


Fig. 104: Generación de plantas y fachadas del Philadelphia City Tower.

Fuente: <https://docplayer.es/49373996-El-diseño-estructural-en-la-arquitectura-reciente-juan-jose-fontana.html>

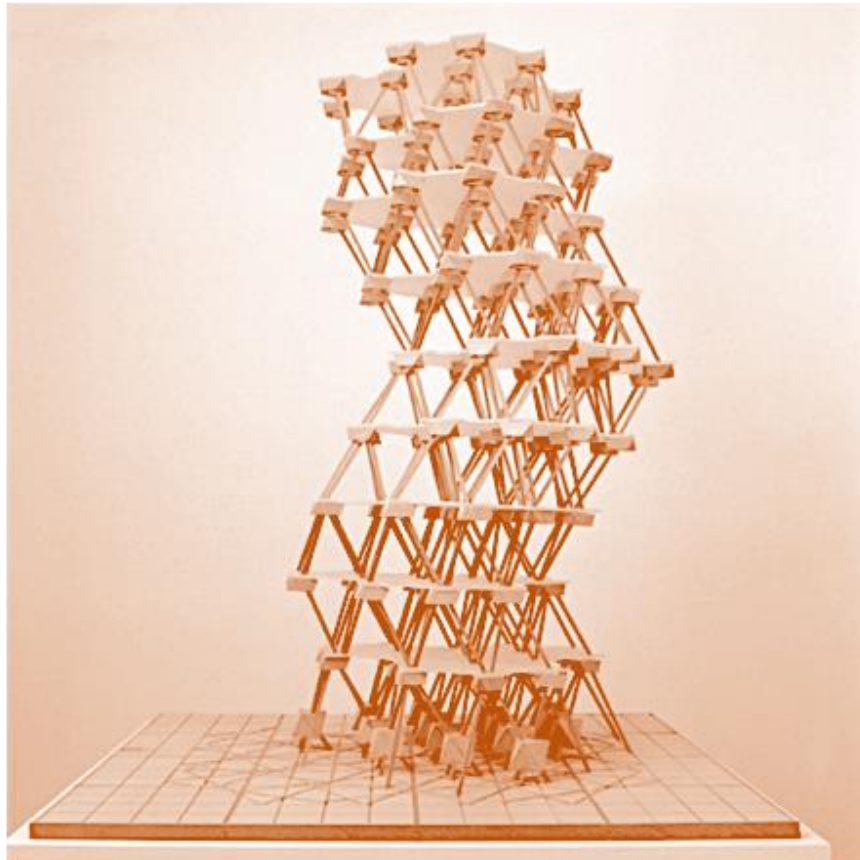


Fig. 105: Analysis: Louis Kahn, *City Tower Municipal Building*

Fuente: <https://archswc.cooper.edu/Detail/objects/1073>

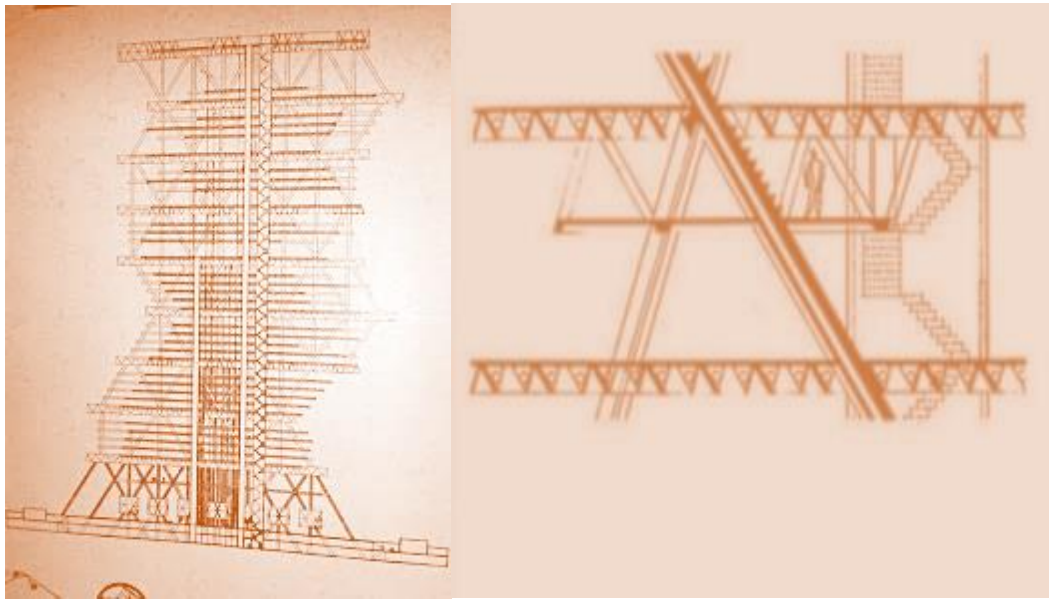


Fig. 106: Estructura del *Philadelphia City Tower*.

Fuente: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2014/01/08/city-tower-1952-57-louis-i-kahn/>

Se puede concluir asumiendo que la geometría estructural ha permitido la isotropía del edificio, debido a la triangulación de las barras que la componen.¹²

ESTRUCTURAS LAMINARES

La experimentación en la construcción de estructuras laminares en hormigón comienza en 1920, alcanzando gran auge en la década del '50 gracias a su eficacia y economía. Es este tipo estructural la que aporta condiciones constructivas óptimas al ser la geometría de la forma la que permite la distribución de cargas eficaces; al mismo tiempo que permite la utilización racional de curvas en el proyecto, aportando superficies más orgánicas. Por añadidura, pueden concretarse como superficies regladas lo que posibilita el armado de encofrados para el hormigón o la construcción con elementos lineales. La necesidad de que el equilibrio de las estructuras quede garantizado mediante cálculos, hace cobrar un protagonismo especial al análisis matemático.

¹² Isotropía: Un material u objeto está dotado de isotropía cuando al aplicar una carga específica en cualquier punto del eje x, y o z, exhiben la misma resistencia, tensión, deformación y dureza.

A principios del siglo XX, los métodos conocidos de análisis de estructuras se basaban en la Teoría de la Elasticidad que toman en cuenta las deformaciones geométricas del material sometido a cargas exteriores y su retracción al retirarlas.

Las Tribunas del Hipódromo de la Zarzuela y la cubierta del Mercado de Algeciras (España) fueron construidas por el ingeniero Eduardo Torroja en 1934. En el primero de ellos, los voladizos no son paraboloides, por lo que no pudo resolverse analíticamente por carecer en ese momento de los elementos matemáticos que permitieran hacerlo. Debíó realizarse un modelo a escala real. La confección de este modelo sirvió para observar el comportamiento estático de la cubierta y también para revisar el procedimiento constructivo, presentando una resistencia del triple de la necesaria para cumplir con las condiciones normales de carga, incluyendo su peso propio y la sobrecarga de nieve

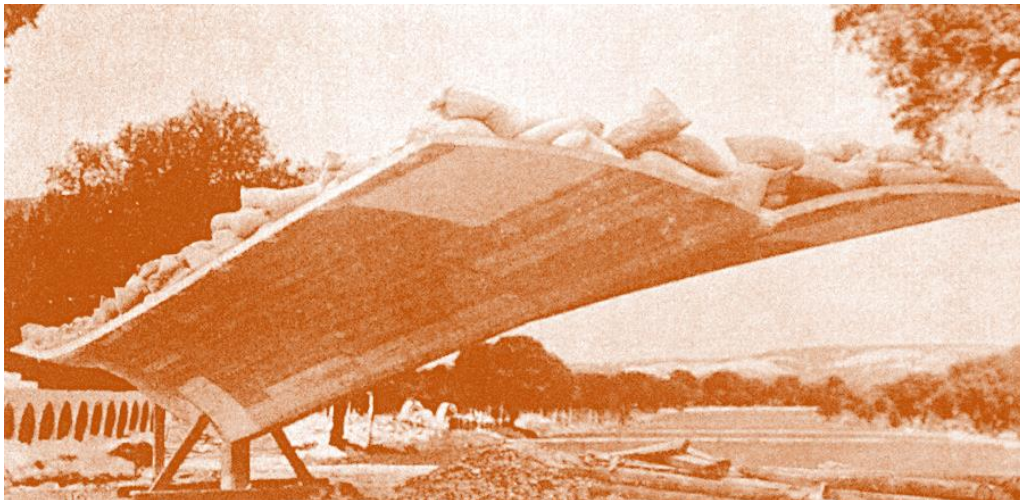


Fig.107: Prueba de carga en un modelo a escala real para la cubierta del hipódromo de La Zarzuela. España.

Fuente: <https://tectonica.archi/articulos/restauracion-y-rehabilitacion-del-recinto-de-carreras-del-hipodromo-de-la-zarzuela-de-madrid/>



Fig108: Tribunas del hipódromo de La Zarzuela, 1935.

Fuente: <https://tectonica.archi/articulos/restauracion-y-rehabilitacion-del-recinto-de-carreras-del-hipodromo-de-la-zarzuela-de-madrid/>

Referido a estructuras laminares, a fines de los '50 aparecieron dos obras paradigmáticas, no simplemente por su resolución estructural, sino por sus implicancias. Estas son: la terminal de pasajeros de la aerolínea *Trans World Airlines* (TWA) del Aeropuerto Kennedy de Eero Saarinen construida entre 1956 y 1962; y las cubiertas de la Ópera de Sídney de Jorn Utzon, concursada en 1957 y concluida en 1973.

TERMINAL DE PASAJEROS DE LA AEROLÍNEA TRANS WORLD AIRLINES (TWA)

A efectos de albergar un espacio sin interferencia de columnas y sin antecedentes en la tradición moderna, Saarinen se inspiró en las bóvedas de crucería góticas a efectos de albergar un espacio sin columnas que dé cabida a varios servicios. La estructura se materializó en hormigón armado, para la forma de las vigas estructurales se usó un sistema de abanico, por el cual las vigas partían de un punto: una gran columna en forma de “Y”, para luego abrirse, siendo su trazado el de los meridianos de una misma esfera haciendo que la línea que las define conserve el mismo radio para todas las vigas.

El análisis teórico realizado por Eero Saarinen sobre la función, sirvió como base para el desarrollo de sus conceptos sobre cómo diseñar una terminal de aviones, evidenciando en su expresión formal, la consideración de las distintas y complejas funciones desarrolladas en un aeropuerto, la resolución estructural y la búsqueda de una estética que satisficiera las expectativas de su época.

Según Peter Papademetriou (1992), las formas sinuosas del proyecto se van ajustando al movimiento de los viajeros trasladándose desde los mostradores de la compañía hacia las áreas de espera. El edificio puede interpretarse desde los supuestos manejados por la biología, donde la función maneja la forma. Saarinen pretendió realizar una representación de la funcionalidad de la Terminal, mediante el empleo de formas orgánicas factibilizadas por una cubierta de hormigón, sometida a un riguroso estudio de la distribución de las cargas.

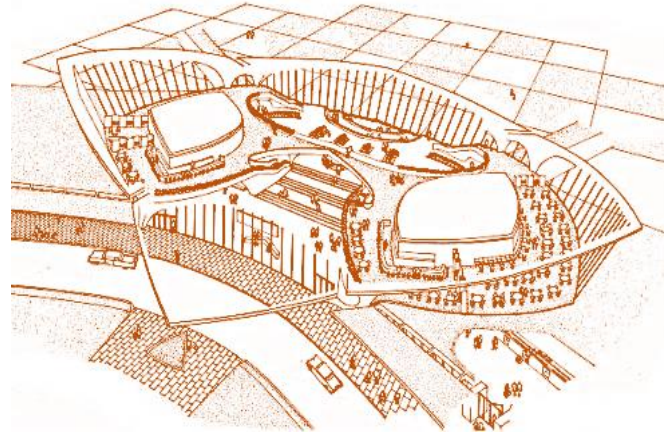
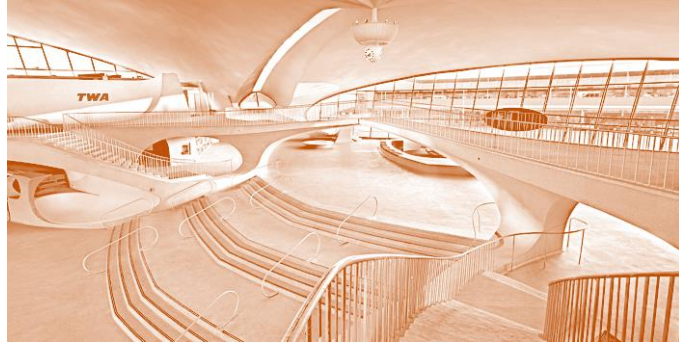


Fig. 109: Foto Interior.

Fuente <https://arquitectolejtman.com/2019/04/19/el-terminal-de-trans-world-airlines-twa-por-aero-saarinen/>

Axonométrica.

Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-de-la-twa-aeropuerto-john-f-kennedy/>

ÓPERA DE SIDNEY

En 1956 se dieron a conocer las bases del concurso para la construcción de un edificio que permitiese realizar conciertos en la ciudad de Sídney. En ellas no se especificaba que el proyecto debía estar resuelto estructuralmente, pues sólo se debían entregar ideas conceptuales que cumplieran con el programa, resultando elegido el proyecto de Utzon en segunda instancia ya que en un primer momento fue rechazado.

Al no haber presentado Utzon resolución estructural, el gobierno invitó a la firma experta en construcciones y estructuras Ove Arup, para que trabajara con Utzon de manera constante y así encontrar una solución a lo que parecía un proyecto inconstruible.

El proyecto de Utzon presentaba cubiertas con formas curvas libres, posibles cáscaras delgadas de hormigón, definidas a nivel de bocetos. Pero si bien se sugería un determinado tipo de elemento estructural para estas cubiertas y un material, no existía una

geometría claramente definida¹³. Las cáscaras principales se conectaban entre sí por una serie de cáscaras secundarias laterales que tampoco tenían una definición geométrica precisa.



Fig. 110: La Opera de Sydney, de JØRN UTZON.
Fuente: <https://catalogo.artium.eus/book/export/html/8640>

Según *The Arup Journal* (1973) los objetivos proyectuales de Utzon eran que la arquitectura se expresara a través de la estructura, la cual debía ser simple, despojada y de una escala majestuosa, combinando cualidades escultóricas con una clara representación de las solicitaciones estáticas.

La firma inglesa Ove Arup & Partners, en primeros cálculos, determinó que la magnitud de los momentos flectores, impedían que la estructura pudiera concretarse mediante cáscaras de hormigón. Es así como comienza un largo proceso que duraría hasta 1961, con el fin de encontrar una geometría y un sistema estructural que brindasen una solución al problema, sin alterar las ideas originales del proyecto. Fueron ensayadas varias soluciones en hormigón armado, hormigón prefabricado y acero, basadas en el uso de geometrías parabólicas, elípticas y circulares, entre otras.

Determinar la geometría precisa de las cáscaras implicaría la estabilidad del conjunto y la factibilización constructiva y estructural. En contra de las formas geométricas que se venían utilizando para brindar optimización estructural, tales como paraboloides elípticos o elipsoides, se definieron todas las cáscaras de la cubierta como trozos de una misma esfera de 75 metros de radio.

¹³ The Arup Journal, vol.8 No3, pp. 4-21, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1973.

El diseño de Utzon establecía únicamente materiales básicos, cosa que no fue posible, optando para el revestimiento exterior de las cubiertas paneles prefabricados; para que esto fuese posible con las técnicas de fabricación de la época, la geometría de las cubiertas debía conservar cierta regularidad. Por lo que, partiendo de una misma esfera, se elaboró un sistema de costillas de hormigón prefabricado.

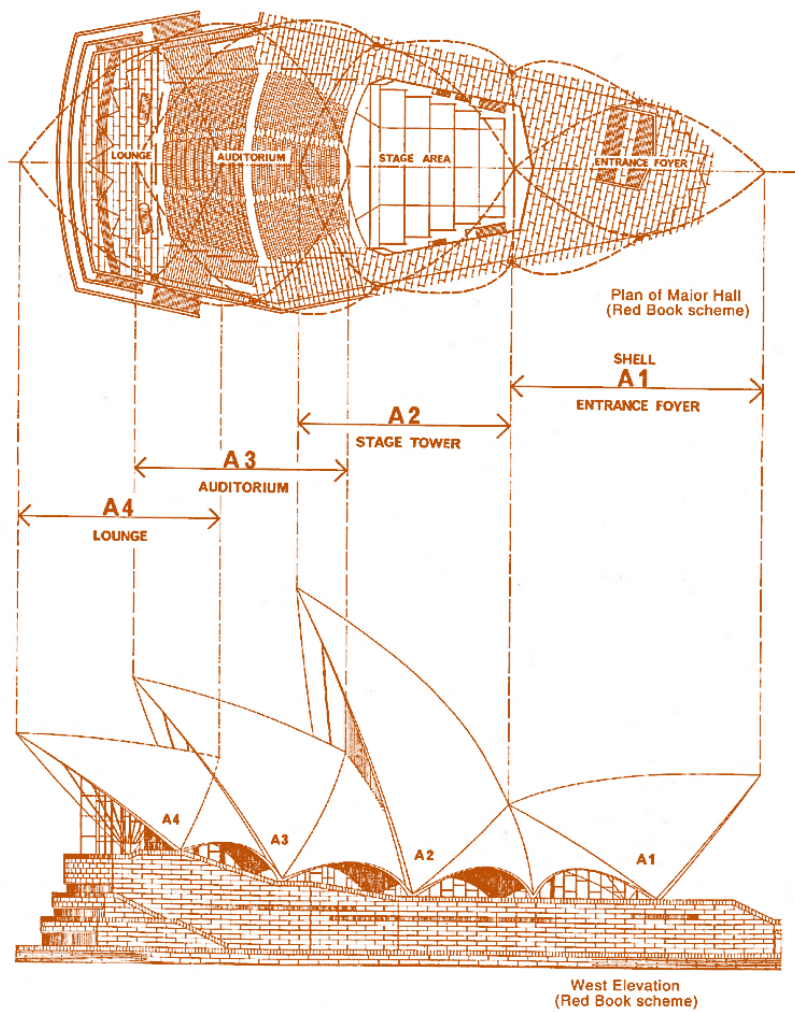


Fig. 111: Correspondencia de planta funcional con cubierta.
Base geométrica de la cubierta de la Ópera de Sydney.

Fuente: [//www.bubblemania.fr/es/jorn-oberg-utzon-sydney-opera/](http://www.bubblemania.fr/es/jorn-oberg-utzon-sydney-opera/)

Fuente: <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-periplo-de-jorn-utzon-con-la-opera-de-sydney-llega-a-la-gran-pantalla>



Fig. 112: Concreción de la estructura de la Ópera de Sydney

Fuente: <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-periplo-de-jorn-utzon-con-la-opera-de-sydney-llega-a-la-gran-pantalla>

La estructura de la Opera de Sídney fue la primera de gran escala en la que se utilizaron cálculos informáticos, a pesar de que la informática estaba en sus comienzos, pues no se la podía resolver manualmente, dada su alta complejidad y la problemática geométrica que presentaba¹⁴. De hecho, los ingenieros de la época ni siquiera tenían claro qué métodos matemáticos resultaban los más apropiados para el desarrollo de herramientas informáticas de cálculo estructural. El ingeniero Peter Rice escribió una serie de programas basados en el método de la flexibilidad, con los cuales se analizó estática y geoméricamente el modelo estructural propuesto.

A partir de esta obra comenzó a afianzarse, en el mundo de la arquitectura, una metodología de trabajo en la que destacados estudios de arquitecturas y grandes empresas de ingeniería colaboran para el desarrollo de proyectos edilicios de alta complejidad.

La empresa Ove Arup & Partners recibió en 1969 el premio *Queen`s Award for Industry* por las innovaciones tecnológicas realizadas en el campo de las cubiertas de hormigón pretensado y, en 1973, un premio especial de la *UK Institution of Structural Engineers*, por su contribución a la creación de la Opera de Sídney.

¹⁴ “El diseño estructural es siempre un proceso iterativo, de modo que cualquier cambio que se realice en la forma de una estructura conduce inevitablemente a una redistribución de los esfuerzos; este hecho resultó particularmente problemático en el diseño de la estructura de la Opera de Sídney dada su alta complejidad geométrica y la elevada cantidad de tiempo que requería la investigación de cada corrección que era necesario realizar “. *The Arup Journal*, vol.8 No3, pp. 4-21, Ove Arup Partnership, Londres, octubre 1973.

PARTE II:

CRISIS DE LOS MODELOS ESTABLECIDOS

CONTEXTUALIZACIÓN

Según se comentó, lo acontecido en el siglo XX indefectiblemente condujo al cuestionamiento y replanteo del orden establecido en diversos campos; entre ellos, la Arquitectura. Específicamente, la matemática y la física entran en crisis, siendo el centro de los ataques, la geometría euclidiana y la lógica newtoniana. La arquitectura, que históricamente se había basado en ambas lógicas para su desarrollo, se verá ampliamente afectada.

Además de los teoremas y principios físico - matemáticos que cuestionaron el determinismo reinante, surgirá un nuevo modelo matemático de interpretación de la naturaleza, la fractalidad, que al igual que la teoría del caos y los nuevos hallazgos matemático – geométricos, serán desarrolladas gracias a la intervención de la informática; al mismo tiempo, ésta utilizará conceptos matemáticos para poder factibilizar sus programas de diseño asistido por computadora (CAD) utilizando los espacios vectoriales y el álgebra *booleana*, siendo ésta una estructura algebraica que esquematiza las operaciones lógicas. Los espacios vectoriales son un modelo matemático de interpretación del espacio real, permitiendo el acceso a más de tres dimensiones.

La arquitectura se valdrá de su muestra de 1988 en el MOMA “Arquitectura Deconstructivista”, donde los participantes mostrarán al mundo, la ruptura de la arquitectura con el paradigma determinista que tuvo por estandarte. De esta exposición, Vicente Medina, en su Tesis Doctoral afirma que: *éste será el comienzo del Deconstructivismo en Arquitectura*¹⁵, oponiéndose a la razón y el orden del movimiento moderno

Frank Gehry prescinde de las leyes clásicas de la arquitectura, proporciones y consideración de los elementos constitutivos tradicionales: carga, soporte, cerramiento.

¹⁵ Medina, Vicente. Profesor Invitado Universidad Nacional de La Plata Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Seminario de Doctorado – Red DOCASUR. “Deconstrucción. Desde el pensamiento filosófico a la arquitectura deconstructivista. Tesis Doctoral: Forma y Composición en la Arquitectura Deconstructivista”. Departamento de Composición Arquitectónica Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España.

II.1. DECONSTRUCTIVISMO

Como ya se mencionó, en 1988, tuvo lugar en el Museo de Arte Moderno (MoMA) la exposición “Arquitectura Deconstructivista” que estuvo organizada por Philip Johnson y Mark Wigley y en la cual presentaron los trabajos de siete estudios de arquitectura: Frank Owen Gehry - Daniel Libeskind - Rem Koolhaas / *Office for Metropolitan Architecture* (OMA) Peter Eisenman - Zaha Hadid - Wolf Prix y Helmut Schwizinsky - Coop Himmelb(l)au - Bernard Tschumi.



Fig. 113: Interior muestra MOMA 1988.

Fuente: <http://deconstructivismo-arquitectonico.blogspot.com/2017/12/exposicion-de-1988-del-moma.html>

Catálogo de la muestra

Fuente: https://assets.moma.org/documents/moma_catalogue_1813_300062865.pdf

En los “proyectos de esta exposición (...) el sueño de la forma pura ha sido alterado” (Johnson, 1988, p. 7). Philip Johnson, refiriéndose a la arquitectura deconstructivista afirma en el prefacio del Catálogo: “La arquitectura deconstructivista no es un nuevo estilo (...) no representa un movimiento; no es un credo, [agregando en el mismo párrafo] (...) Es una concatenación de tendencias afines en varios lugares del mundo”. (Johnson, 1988, p. 7).

En un primer momento se hablaba de la influencia en el deconstructivismo, de la filosofía de Derrida y el constructivismo ruso.

Respecto a la influencia filosófica, tanto Johnson como Wigley han negado el paralelismo de la filosofía con el deconstructivismo, basándose en que esto podría llegar a plantearse con Peter Eisenman y Bernard Tschumi, dado que Eisenman es Doctor en Filosofía y condecorador de Derrida; mientras que Tschumi confesó su interés por las Letras como también por la Filosofía. No es extraño, por lo tanto, que existiera entre Derrida,

Eisenman y Tschumi una actividad dialéctica, que terminará involucrándolos en el proyecto del *Parc de la Villette* (París, 1982).

Referido a la influencia del constructivismo ruso, Catherine Cooke, al igual que Josep María Montaner y Kenneth Frampton, afirmaron que de los arquitectos que participaron de la exposición, a los que se los puede relacionar con el constructivismo ruso son, Eisenman, Tschumi, Frank Gehry y Zaha Hadid dado que habían realizado exposiciones o publicaciones sobre el tema; al que se les suma Rem Koolhaas por haber viajado a Rusia en búsqueda específica de información.

El interés por parte de estos arquitectos en el formalismo del constructivismo ruso aparece en seis aspectos: “fragmentación y superposición, macla, torsión, pliegue y retícula”¹⁶.

Por lo expuesto, no podemos decir que haya una ideología totalizadora y común que asocie a todos los que integraron este grupo, salvo su oposición al post modernismo. Cada uno se opuso a su manera, pero podemos encontrar características comunes en las obras presentadas.

En ellas se alejan de la geometría euclidiana, rompiendo con la imagen de orden y equilibrio sustentado por el sistema, atacando algunos de los principios de la arquitectura como la estructura y la envolvente del edificio. Otra de las características es la impredecibilidad, característica propia de los sistemas complejos.

¹⁶ Medina, Vicente Profesor Invitado Universidad Nacional de La Plata Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Seminario de Doctorado – Red DOCASUR. “Deconstrucción. Desde el pensamiento filosófico a la arquitectura deconstructivista. (2003) Tesis Doctoral: Forma y Composición en la Arquitectura Deconstructivista. Departamento de Composición Arquitectónica Escuela técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España.

II.2. EXPOSICIÓN “ARQUITECTURA DECONSTRUCTIVISTA”: PROYECTOS

FRANK GEHRY: CASA GEHRY, SANTA MÓNICA CALIFORNIA 1978 – 1988

Con base en una vivienda colonial suburbana, con trazados ortogonales, Gehry consigue que el ángulo recto pierda su protagonismo, mientras que la estructura perfora la envolvente, no queda en claro, en determinados puntos, cuáles son las cargas que soporta; mientras que en otros puntos cómo logra soportarlas. “La casa Gehry es una remodelación en tres fases de un edificio suburbano existente. La casa original está ahora entrelazada con varios añadidos entrecruzados de estructuras conflictivas”¹⁷. (1988, 22)

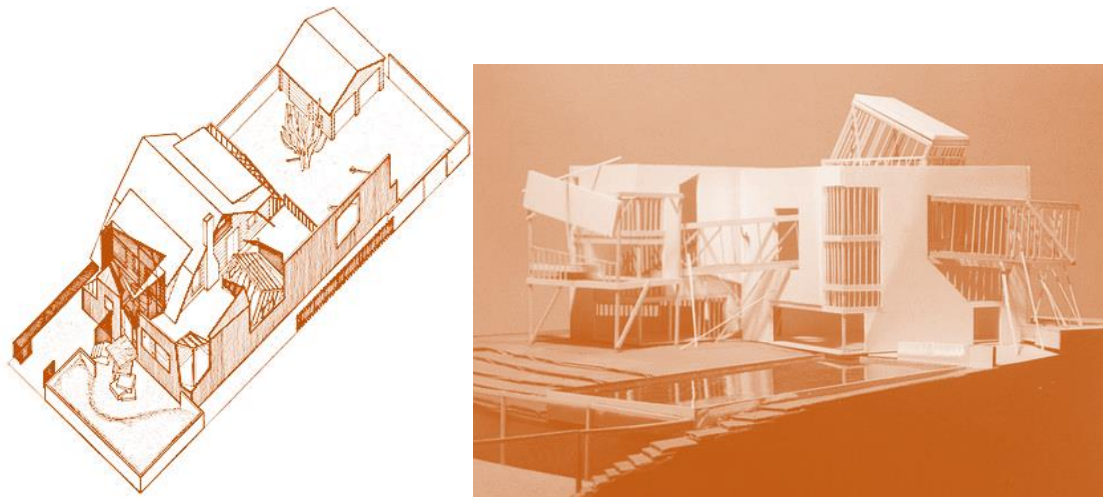


Fig. 114: Gehry, Casa Gehry, Santa Mónica California 1978 – 1988- Axonométrica y maqueta.
Fuente: <https://inperfecto.com.mx/2019/12/15/arquitectura-deconstructivista-parte-3/>

DANIEL LIBESKING, BORDE URBANO. BERLIN, REPÚBLICA FEDERAL ALEMANA. 1987

“El proyecto del Borde Urbano (...) es una enorme barra que se levanta formando un ángulo sobre el suelo, de manera que uno de sus extremos flota a diez plantas de altura, mirando por encima del Muro de Berlín (...). La

¹⁷ Philip Johnson y Mark Wigley (1988) “Arquitectura Deconstructivista” p.22 Editorial Gustavo Gili, Barcelona

barra es una abstracción del muro, atravesando la ciudad, partiendo fragmentos de la vieja estructura urbana”. (Johnson & Wigley, 1988, p. 34).

Esta fragmentación también aparece en el muro mismo, al ser dividido en secciones que son giradas entre sí; es de esta forma que también fragmenta la estructura resistente. Libeskind con su geometría trasgrede linealidades, estructuras resistentes, urbanísticas y socio - políticas. Se llega a colocar por encima del Muro de Berlín.

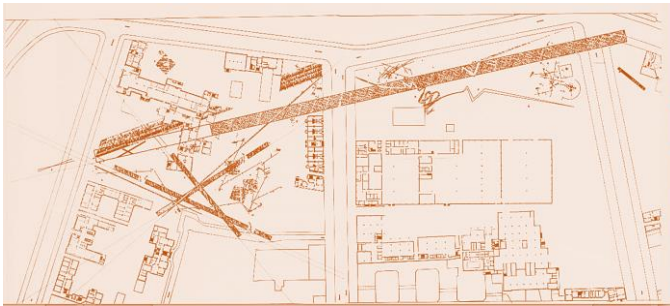


Fig. 115: Borde Urbano – Berlín.
Plano de conjunto.
Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 36



Fig. 116: Borde Urbano – Berlín.
Maqueta de conjunto.
Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 37

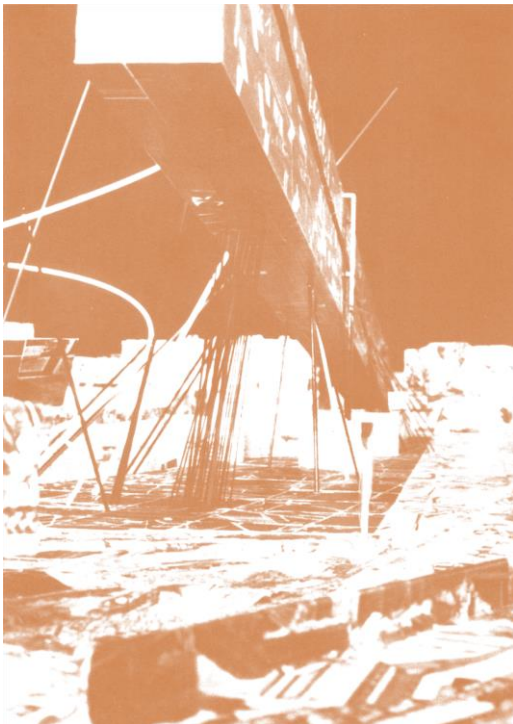


Fig. 117: Borde Urbano – Berlín. Detalle de maqueta de conjunto.
Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 3

REM KOOLHAS (OMA), EDIFICIO DE APARTAMENTOS Y TORRE DE OBSERVACIÓN. ROTTERDAM. HOLANDA, 1982

El gran edificio se presenta urbanísticamente con una ambigüedad impensable en el campo de la Arquitectura moderna en general o el posmodernismo en particular, ya que presenta caras distintas, una hacia el río y la otra hacia la ciudad.

“El edificio se sitúa enigmáticamente entre ser esencialmente un simple bloque, un monolito homogéneo (como lo son sus vecinos) distorsionado por una serie de torres, o ser esencialmente una sucesión de torres discretas distorsionadas por un bloque”. (Johnson & Wigley, 1988, p. 45).

Existe gran tensión entre el bloque y las torres que lo constituyen, por añadidura éstas presentan distintas inclinaciones lo que provoca sensación de inestabilidad

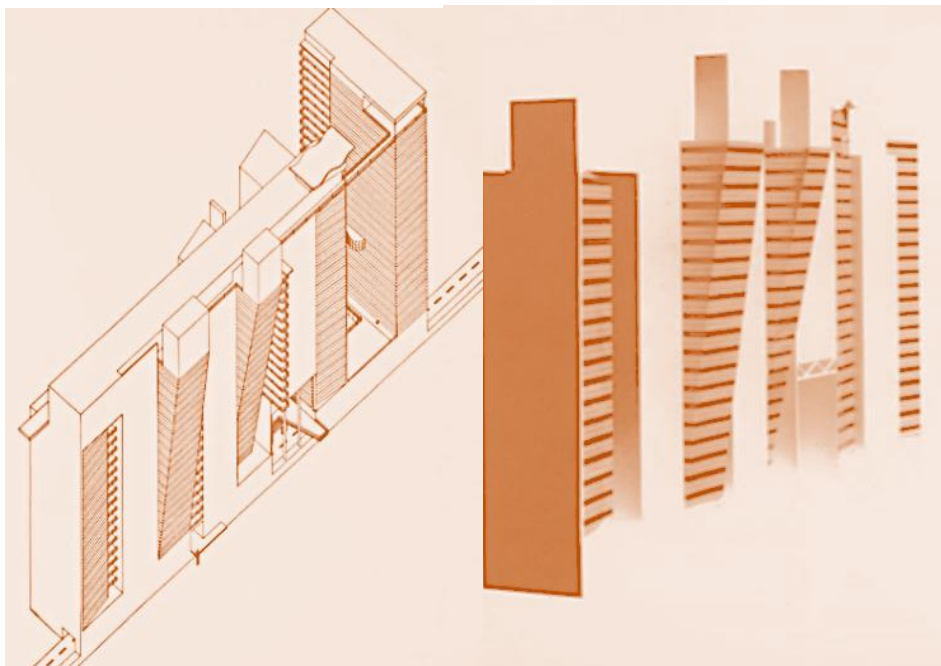


Fig. 118: Edificio de apartamentos y torre de observación. Rotterdam, Holanda, 1982
Maqueta definitiva.

Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 49 y 50

**PETER EISENMAN, BIOCENTRO PARA LA UNIVERSIDAD DE
FRANKFURT, REPÚBLICA FEDERAL ALEMANA. 1987**

Partiendo de un eje racional (columna vertebral), del que se desprenden cuatro volúmenes, se van añadiendo formas básicas con una direccionalidad distinta a la planteada por el eje, lo que provoca conflicto entre ellas. El resultado es un diálogo complejo entre la forma básica y sus distorsiones. (Johnson & Wigley, 1988, p. 56).



Fig. 119: Universidad de Frankfurt, República Federal Alemana.
Maqueta de conjunto - axonómica eclosionada: unidades básicas, columna vertebral, conjunto de volúmenes.

Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 57 y 58

ZAHA HADID, *THE PEAK*. HONG KONG. 1982

Para su proyecto de este club, Zaha Hadid transforma la topografía natural de la zona de implantación, excavando y construyendo una serie de colinas artificiales sobre la roca excavada. En la topografía artificial introduce vigas a modo de rascacielos horizontales: “La fuerza del proyecto proviene de la violenta intersección de esas vigas lineales y los volúmenes de la topografía artificial”. (Johnson & Wigley, 1988, p. 68).

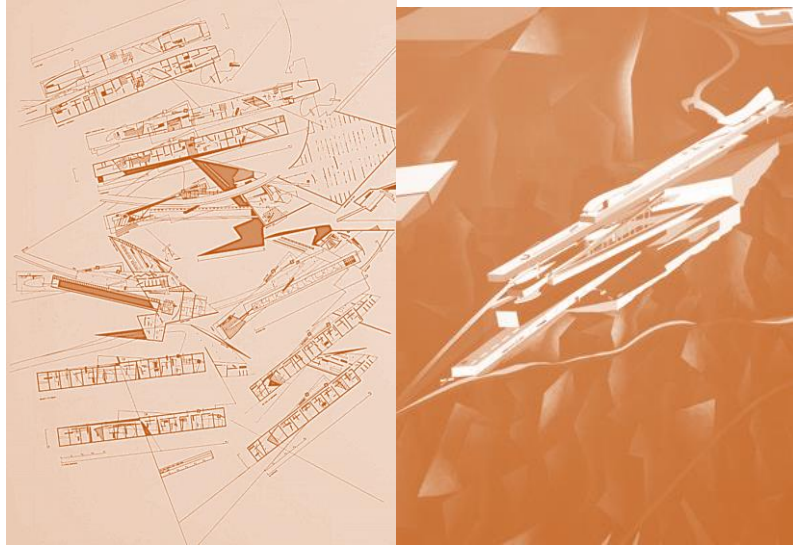


Fig. 120: The Peak74, Hong Kong, 1982.
 Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P.

COOP HIMMELBLAU, REMODELACIÓN DE UN ÁTICO. VIENA, AUSTRIA. 1985

Este proyecto parece burlarse de la geometría euclidiana y la lógica newtoniana. Sin embargo, como se detalla en el catálogo, refiriéndose a la estructura, es “una construcción metálica cuya forma aparentemente caótica es el resultado de un detenido análisis de la estructura mayor en la que habita.” (Johnson & Wigley, 1988, p. 80)

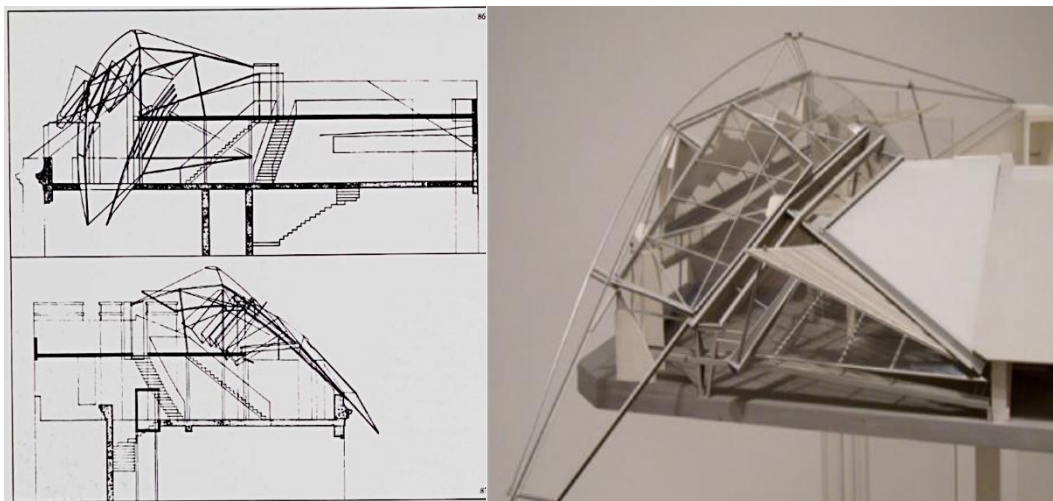


Fig. 121: Remodelación de un ático, Viena, Austria.
 Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 82

BERNARD TSHUMI, *PARC DE LA VILLETTE*. PARÍS, FRANCIA. 1982 - 1985

Este proyecto será analizado más adelante, cuando sea tratada la manifestación en arquitectura, de los principios científicos del siglo XX, que ponen en crisis los modelos vigentes¹⁸. “El parque es un ensayo elaborado sobre la desviación de las formas ideales. Obtiene su fuerza de la conversión de cada distorsión de un ideal, en un nuevo ideal que es a su vez distorsionado” (Johnson & Wigley, 1988, p. 92).

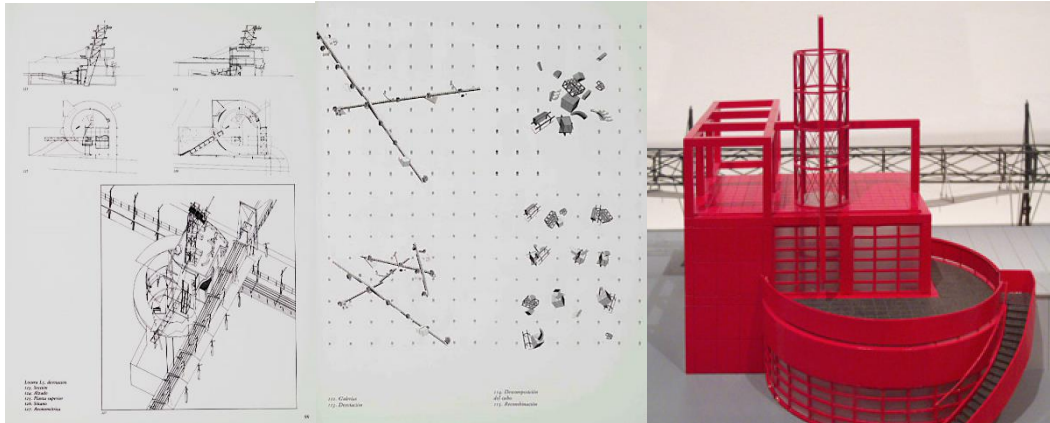


Fig. 122: Superposición de tres sistemas geométricos: puntos, rectas y superficies. Fuente: Catálogo de la muestra del MoMA 1988. P. 95, 96 y 97

¹⁸ Ir a Parte II, “El Principio de indeterminación de Heisenberg”.

II.3. SIGLO XX: ATAQUES FILOSÓFICOS Y CIENTÍFICOS AL ORDEN ESTABLECIDO.

CORRELATO ARQUITECTÓNICO DEL DISCURSO DE FRIEDRICH NIETZSCHE, (1844 – 1900). FIN DE LOS ABSOLUTOS Y LAS METODOLOGÍAS ESTABLECIDAS

Friedrich Nietzsche realiza una feroz crítica de los valores morales, religiosos y científicos de su tiempo.

“Una nueva exigencia aparece en el horizonte. Enunciémosla: necesitamos una crítica de los valores morales, hay que poner en entredicho el valor mismo de esos valores” ... (Nietzsche, 2011 [1887], p. 64).

Cuando en 1988 se realiza la exposición del MoMA, los proyectos presentados representan la crítica de los cánones y estéticas establecidos, valiéndose para ello de la transgresión de la jerarquía de la geometría euclidiana y la lógica newtoniana, “poniendo en entredicho esos valores”, parafraseando a Nietzsche.

En 1882, el filósofo, “mata a dios”, y si bien otros filósofos lo habían hecho con anterioridad, él no va a buscar reemplazo alguno. Dios ha muerto, es decir, mueren los absolutos. En su famoso ensayo "El Loco," escrito para el periódico, *Gay Science* declara:

¿No oísteis hablar de aquel loco (...) gritando sin cesar: «¡Busco a Dios! ¡Busco a Dios!»... El loco... exclamó: ¿Dónde está Dios? Os lo voy a decir. Le hemos matado [...] ¡Dios ha muerto! [...] La enormidad de este acto, ¿no es demasiado grande para nosotros? (Nietzsche, 1957 [1882], pp. 95-96).

Dando muerte al gran absoluto representado por Dios, el máximo de los absolutos y por lo tanto a las seguridades que de ello deriva, cabe preguntarse: ¿dónde quedan las seguridades que justificaban mediante los cánones establecidos la obra de Arquitectura? En definitiva, ésta es una simple disciplina más del conocimiento desarrollada por el ser humano y fundada en concepciones metódicamente consolidadas, representantes de la perfección y generadoras de una ciencia por la cual el ser humano iba a superarse a través del progreso.

Parafraseando a Eisenman (1987), la muerte de Dios ha tenido muchas consecuencias de las cuales no es la menor, tener que arreglárnosla sin él. Esto nunca fue tan evidente, quizás, como en la crisis de la cultura moderna.

En 1883, en el *Zarathustra*, expresa la importancia del camino recorrido por cada ser humano en particular, por encima del sendero ya trazado. También establece la importancia de la exploración, sobre la meta alcanzada.

Cada obra de la exposición del MoMA, muestra un camino distinto, cada uno de ellos, correspondiente a búsqueda particular de los distintos autores, ninguno siguió el camino trazado.

Si no existen los absolutos, ¿por qué deberían existir los juicios de valor? ¿por qué seguir cánones y estrictas reglas tipológicas con sus parámetros de belleza y orden? Llevando estos interrogantes a la Arquitectura, podríamos tener como respuesta que ésta ya no tiene la obligación de tender a un único resultado imbuído de la razón absoluta. Lo hallado en el camino puede ser más importante que el enunciado propuesto en primera instancia. “Por muchos caminos diferentes y de múltiples modos llegué yo a mi verdad (...) ‘Éste es mi camino, ¿dónde está el vuestro?’ ¡El camino, en efecto, no existe!”. (Nietzsche, 1951 [1882], p. 24).

En el ámbito de la ciencia, en el siglo XIX, la biología ya se encontraba realizando avances fuera de la mirada tradicional; la ciencia en general comenzaba su ataque a los modelos establecidos, siendo la matemática, la física y la química, grandes protagonistas del proceso de cambio; la Arquitectura acusaría recibo de ello. Llega el fin de rígidas tipologías y normas preestablecidas; si además consideramos el cuestionamiento de las ciencias, ya no podrá ser la geometría euclidiana la que ordene el proyecto, tampoco la lógica newtoniana indispensable para la concreción.

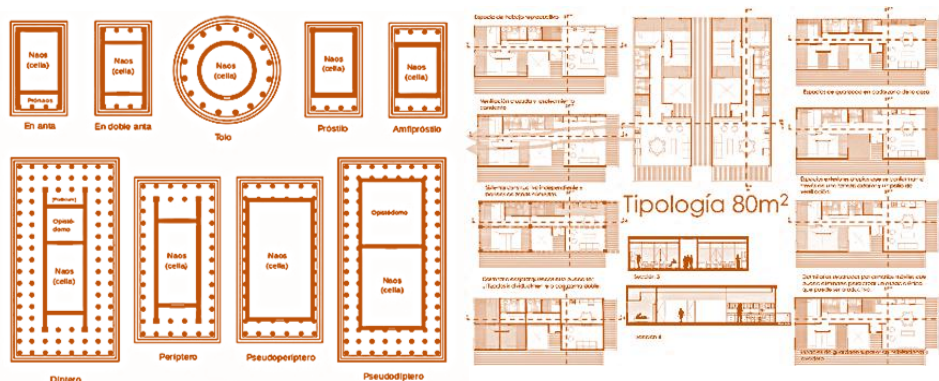


Fig. 123: La muerte de los absolutos y las tipologías.

Fuente: https://www.urbipedia.org/hoja/Arquitectura_de_la_Antigua_Grecia

<https://josejuangarza.com/portafolio/master-laboratorio-de-la-vivienda-del-siglo-xxi/taller-de-tipologias-de-vivienda/>



Fig. 124: Casa Gómez - Sergio Orduña. Puerto Cancún
Cada hombre traza su camino.
Fuente: <https://www.revistadeck.com/casa-gomez/>

Actualmente, gracias a la aplicación de las herramientas informáticas y con el proyectista considerado una variable más del proyecto se hace más que evidente, que no hay soluciones únicas y que cada hombre sigue su camino, sin desprecio de las diferentes opciones que pudiesen surgir.

JACQUES DERRIDA (1933 – 2004). EXPRESIÓN A TRAVÉS DE LA NEGACIÓN DE LOS CÁNONES EUCLIDIANOS

En octubre de 1966 tuvo lugar en Baltimore un coloquio entre algunos de los más conocidos filósofos y teóricos franceses, incluido Jacques Derrida, y es en este contexto que aparece el concepto de deconstrucción.

Jacques Derrida, filósofo posestructuralista, dio origen al término deconstrucción ampliando el término alemán utilizado por Heidegger en *Ser y tiempo: Destruktion*, tomando la traducción “deconstrucción” en vez de la traducción “destrucción”. Deconstruir lo existente, para volver a construirlo.

Concretamente en los años sesenta, la propuesta del "deconstructivismo" se perfiló como desafío para el discurso de lo "moderno", no sólo en la filosofía, sino también en diversas áreas del conocimiento. Por añadidura, su pensamiento implica una dimensión sociopolítica, ya que plantea la lucha contra todas las instancias que centralizan el poder y excluyen la contradicción.

Heredero de Nietzsche y Heidegger, Derrida se ocupa principalmente de la metafísica tradicional y su intrínseco sistema de pares axiológicos que la caracteriza. Unos pares de opuestos que el pensamiento occidental ha asumido y utilizado desde siempre como

hombre/mujer, sujeto/objeto, verdad/error, moralidad/amoralidad, espíritu/materia, naturaleza/cultura, caucásico/negro, cristiano/pagano, etcétera. Uno de los cuestionamientos de Derrida consiste en el planteo de los opuestos binarios con repercusión en las artes y la arquitectura. Según Medina, de estos planteamientos, hay dos que merecen especial atención y a los que algunos arquitectos deconstructivistas le han dedicado un lugar importante en sus proyectos. Nos referimos al binomio orden/caos y función/forma. (Medina, 2012, pp. 17 - 21).

Como ya se vio, desde los griegos, el orden representado por el número y sus proporciones se impuso en la arquitectura, de ahí en más, a lo largo de la historia, simetrías y composiciones tendían a alcanzarlo. Para el Movimiento Moderno, el orden irá de la mano de líneas reguladoras, funcionalismo y racionalismo. Los deconstructivistas buscaron la impredecibilidad y un orden oculto en el aparente caos.

En consonancia con aquello, podríamos acotar que para los modelos deterministas el orden se establece mediante las proporciones, el ángulo recto, las mallas ortogonales y los sistemas de ejes coordenados cartesianos; el deconstructivismo usará sus opuestos para expresarse y generar la visión de caos.

Si en 1966 aparece la deconstrucción en filosofía; en 1969, Eisenman concibe su *House I*, en la que aparecen materializadas las primeras ideas deconstructivistas, las cuales se acentúan en la *House II*. La Casa I fue un intento de concebir y comprender el entorno físico de una manera lógicamente coherente, potencialmente independiente de su función o su significado. (Eisenman, 1968).



Fig. 125: House I. Eisenman
Fuente: <https://eisenmanarchitects.com/House-I-1968>

Eisenman confiesa que la lectura de Derrida, Chomsky, Saussure, Foucault, Deleuze, Guattari, etc., cambió su forma de pensar, influyendo en su trabajo (de modo trascendental, porque estos textos representan según él "un aspecto del *Zeitgeist*"¹⁹ (espíritu de la época). (Zaera-Polo, 1997, p. 12).

Por su parte, en Tschumi se puede leer una impronta filosófica al haber coincidido con Eisenman y Derrida en el *Parc de la Villette*, además de conferirle el simbolismo del concepto lacaniano de esquizofrenia el encuentro de las tramas de ordenamiento del parque.



Fig. 126: El Parc de la Villette.
Fuente : <https://nomada.uy/guide/view/attractions/4363>

¹⁹ *Zeitgeist*: del alemán *Geist*: el espíritu y *Zeit*: de un tiempo. *Zeitgeist*, se refiere al clima intelectual y cultural dominante de una época, particularmente en el pensamiento hegeliano, una era en la progresión dialéctica de una persona o el mundo entero. El concepto de *Zeitgeist* está asociado a la filosofía de la historia de Hegel.

II.4. AVANCES CIENTÍFICOS Y LA UTILIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL Y LA ESTRUCTURA.

De los avances científicos de la primera mitad del siglo XX, tan sólo consideraremos la Física Cuántica, el Principio de Indeterminación de Heisenberg, el Principio de Complementariedad de Niels Bohr y los Teoremas de Incompletitud de Kurt Gödel por considerar que éstos pueden presentar su correlato en la expresión de la arquitectura de la época.

FÍSICA CUÁNTICA, INCERTIDUMBRE DE LA UBICACIÓN EN EL ESPACIO

A comienzos del siglo XX, surge un nuevo paradigma científico, la física cuántica. En 1900, Max Planck (considerado el padre de la teoría cuántica) descubrió la constante fundamental que lleva su nombre, que es utilizada para calcular la energía de un fotón. Poco después enuncia la *Ley de Planck*, sentando las bases de la física cuántica.

La ley de Planck establece que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con una temperatura T viene dada por la siguiente ley:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

$I(\nu) \delta\nu$, es la cantidad de energía por unidad de área, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido, emitida en el rango de frecuencias entre “ ν ” y “ $\nu+\delta\nu$ ”; h es una constante que se conoce como constante de Planck, “c” es la velocidad de la luz y “k” es la constante de Boltzmann.

La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley de Wien y la potencia total emitida por unidad de área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann. Será a mediados de la década del '20 cuando se logren las primeras fórmulas matemáticas completas de la mecánica cuántica.

Este nuevo paradigma contradice a la mecánica clásica, determinista, que según Laplace, “si en un instante determinado conociéramos las posiciones y velocidades de todas las

partículas en el universo, podríamos calcular su comportamiento en cualquier otro momento del pasado o del futuro.

Esta expresión de Laplace se basa en el determinismo y la predictibilidad, ambos se alejan de la visión del espacio arquitectónico presentado por los participantes de la exposición del MoMA, que han dejado de lado todos los cánones geométricos y estructurales establecidos, inclusive, contradiciéndolos.

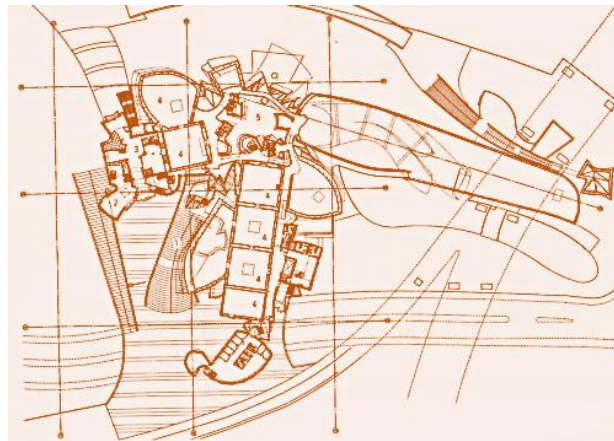


Fig. 127: Frank Gehry, planta de accesos del Guggenheim de Bilbao. Falta de paralelismo y curvaturas en las escaleras de acceso.

Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/guggenheim-bilbao/>



Fig. 128: Escalera de acceso.

Fuente: <https://www.abcviajes.com>

El uso que hace Gehry de la geometría en el diseño de sus escaleras, en el Guggenheim, demuestran la imposibilidad del usuario de calcular las distancias, provocando una perspectiva distorsionada.

EL PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN DE HEISEMBERG (1927)

En 1924 Werner Karl Heisenberg (1901 – 1976) enuncia el Principio de Indeterminación, por el cual afirma que: la posición exacta de un electrón dentro de un núcleo atómico en un momento dado no podía conocerse con certeza, sino que solo se calculaba estadísticamente dentro de una probabilidad.

Este principio implica que la posición y la velocidad de un objeto no pueden ser medidas al mismo tiempo y el hecho de determinar la región en la que se encuentra un objeto, es tan solo una probabilidad.

Dicho en términos del observador, las características de velocidad, movimiento y masa de un observable cambian según la posición del observador, por lo tanto, la medida exacta de un objeto es incierta. Lo observado está supeditado al observador.

Dicho con otras palabras, el lugar del observador cambia lo observado.

El principio de Indeterminación de Heisenberg muestra que la mecánica cuántica es una teoría no determinista (...) sólo predice las probabilidades de que en un experimento se obtenga un determinado valor para un observable dado. En este sentido, la medición de una determinada magnitud conlleva una incertidumbre intrínseca respecto de su resultado. (Bosyk, 2014, p. 2).

Los deconstructivistas se encargarán de mostrar y acentuar esta incertidumbre, desorientando al sujeto en sus recorridos y percepción del espacio.

Bernard Tschumi, en el *Parc de la Villette* parte para su diseño del canal artificial de agua, el cual lo atraviesa de Este a Oeste y utiliza, para la determinación espacial, tres sistemas geométricos independientes y superpuestos, causando sensación de incertidumbre respecto de su ubicación al espectador. En el parque aparecen tres sistemas geométricos superpuestos, uno de puntos, uno de líneas y otro de superficies.

Los puntos están representados por los “Folies”, volúmenes ubicados en las intersecciones del trazado de una malla ortogonal, que toma el espacio.

La línea está representada por los recorridos, materializados por galerías y pasarelas; estas líneas no conservan la dirección de la estructura reticular ordenadora de las Folies, lo que

desorienta al espectador respecto de su ubicación en el espacio. La visión que se tenga del objeto dependerá del lugar en el que se encuentra el sujeto.

Las superficies son representadas por los espacios verdes. La superposición de sistemas genera desconcierto y conflicto al encontrarse las tramas desorientando al sujeto, por más que se haya utilizado geometría euclidiana para generarlos.

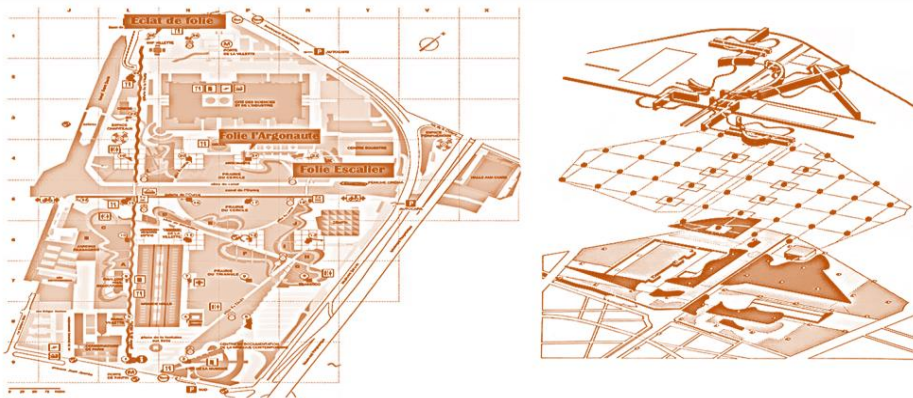


Fig. 129: Sistemas geométricos superpuestos del Parc la Villette, Bernard Tschumi.
Fuentes: <https://www.udg.org.uk/publications/articles/parc-de-la-villette-paris>

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD DE NIELS BOHR (1927 – 1930)

Partiendo de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, Niels Bohr (1885 – 1962) estableció su idea de Complementariedad. Este principio enuncia que los distintos lenguajes son posibles y los distintos puntos de vista sobre el sistema son complementarios. No existe la posibilidad de un único punto de vista de la realidad.

A fines del año 1966 (...) el Principio de Complementariedad alcanza una significación cada vez más trascendental para todas las ciencias (...) en un sentido objetivo: atraviesa todas las ciencias (...) en el sentido subjetivo crea un nuevo estilo de pensar (...). (Strobl, 2007, pp. 185 – 186).

Dejando de lado la problemática referida a si la arquitectura es ciencia o arte, simplemente diremos que también la alcanza el enunciado. Veamos como la arquitectura deconstructivista materializa estos principios: al igual que en la física cuántica, donde el principio de Heisenberg y el de Bohr son complementarios, el reflejo de ellos en arquitectura es tan complementario como en la física.

No sólo el objeto cambia según la posición del observador, esto lo acabamos de ver con el ejemplo del *Parc de la Villette*, sino que nunca podremos abarcar de una sola mirada la obra, jamás podremos presentir su totalidad, incluyendo su historia o, mejor dicho, la ficción de esta, tal el caso de los proyectos de las Ciudades Ficticias de Eisenman.

Lo enunciado hace que cambie constantemente la mirada del observador al enfrentarse a las distintas situaciones que nos presenta la obra y que la visión de ésta cambie según la posición del observador, en tiempo y espacio.

Gille Deleuze expone gráficamente en *El Pliegue* (1989) la relación existente entre un punto de inflexión y un punto de vista. Así, el punto de inflexión al implicar lo interior y lo exterior, lo cóncavo y lo convexo, hace que ese punto de vista cambie de posición constantemente. El punto de vista se convierte en varios, en múltiples. Los deconstructivistas entienden que el objeto arquitectónico es la materialización de un elemento que se ha contemplado desde múltiples puntos, desde todos los ángulos posibles.

Eisenman partiendo de un cubo hueco y considerando tres aristas continuas del mismo, conforma un elemento “L”, concluyendo en un vacío central.

Para Eisenman (2016) simboliza el desplazamiento del sujeto humano desde el lugar central de la tradición occidental.

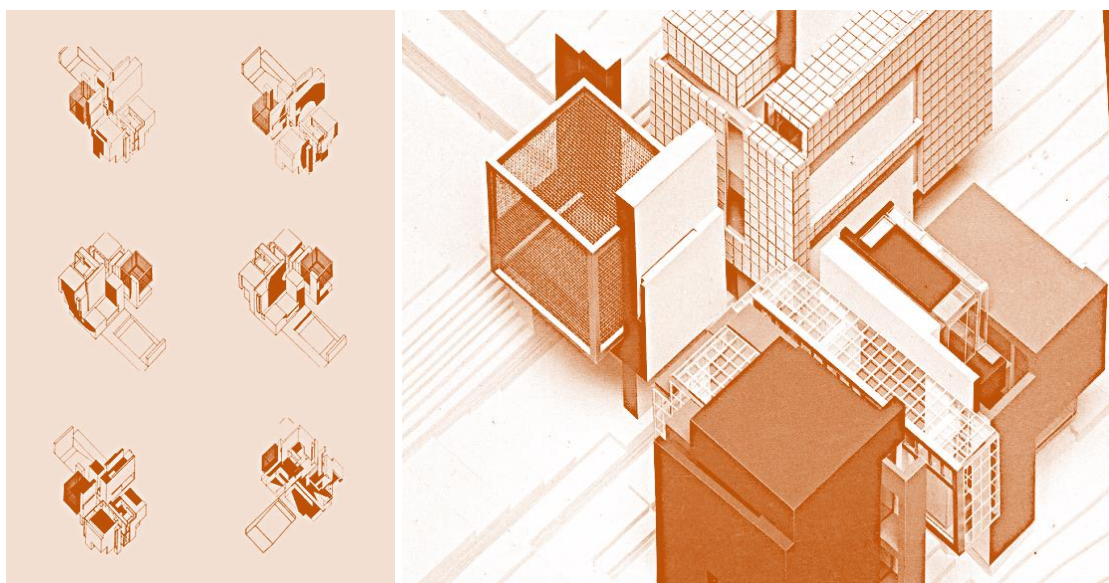


Fig. 130: *House X*. Eisenman
Fuente: <https://eisenmanarchitects.com/House-X-1975>

Quien observa ya no posee una posición central única con una mirada irrefutable y su visión se corresponderá según sea su perspectiva en el espacio. En los proyectos de las “Ciudades Ficticias”, a esta multiplicidad de mirada se sumarán, en el origen del proceso proyectual, un sinnúmero de posibilidades. Incertidumbre misma al proyectar.

Implementar la metáfora de injerto utilizada en la estrategia del *scaling*, le permitirá a Eisenman sumar tres puntos de vista, pero a través del tiempo: la ausencia, la presencia y la inmanencia.

En la Casa de la Cultura de Santiago de Compostela, Eisenman expresará los tres puntos de vista enunciados, al superponer tres elementos: una cuadrícula cartesiana, el trazado urbanístico del casco histórico de Santiago de Compostela y la topografía del lugar. A lo anterior sumó las trazas de la concha que refieren al milagro de Santiago, lo que analizaremos al desarrollar Diagramática.

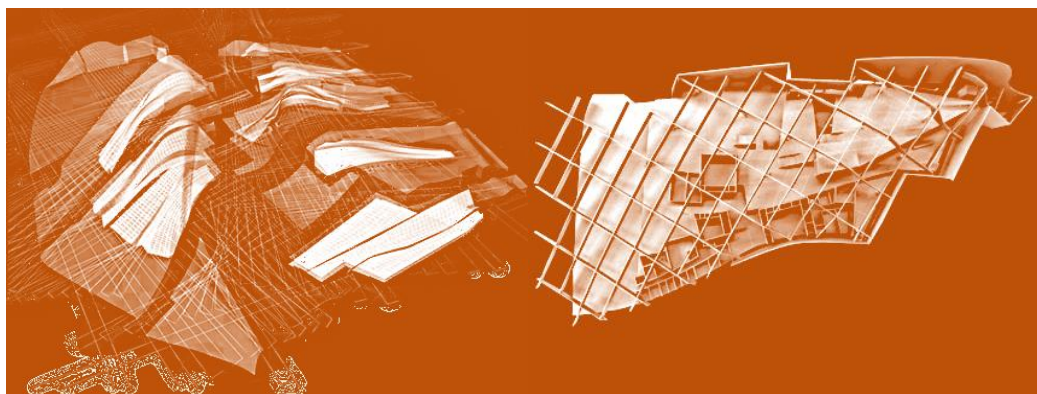


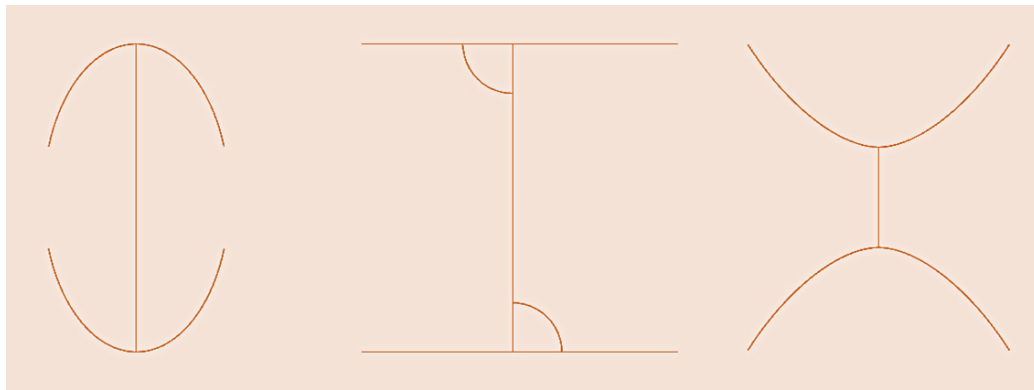
Fig. 131: Superposición de tramas y tiempo en la Casa de la Cultura de Santiago de Compostela.

Fig. 132: Maqueta de la Casa de la Cultura de Santiago de Compostela.

Fuentes: <https://05estudio.wordpress.com/2013/08/29/ciudad-de-la-cultura-de-santiago-de-compostela/>

LOS TEOREMAS DE INCOMPLETITUD DE KURT GÖDEL (1931)

Dos mil doscientos años después de sistematizarse la geometría euclidiana, ésta entra en crisis pues se cuestiona el quinto de sus postulados. Cuestionamiento que, para colmo de males, parten de dos afirmaciones opuestas. Esta situación no traería mayores desvelos a los matemáticos, ya que cada una de las afirmaciones que negaba el quinto postulado, daría origen a una nueva geometría; teorías geométricas, perfectamente sistematizadas de manera determinista. Cada una de ellas surge al considerar la curvatura del universo de distinto modo: ellas son, la geometría elíptica y la geometría hiperbólica.



Elíptica.

Euclídea.

Hiperbólica

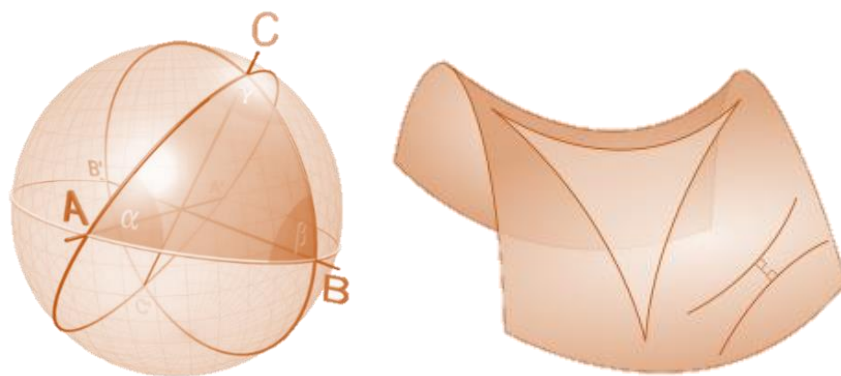


Fig. 133: Las tres teorías geométricas derivadas de la negación del Quinto Postulado de Euclides
Fuente: Elaboración propia

El mundo de la razón seguiría durmiendo en paz, al menos por unos años. La matemática, hasta el siglo XIX se había desarrollado basada en que todo lo verdadero es demostrable. Hoy sabemos empíricamente, que nada en la vida es así.

Fue en 1931, cuando la paz de la certeza de la verdad demostrable se interrumpa. Kurt Gödel (1906 – 1978) puso, definitivamente en tela de juicio la irrefutabilidad de la matemática al enunciar y demostrar sus Teoremas de Incompletitud. El primero de ellos afirmó que:

Todo sistema axiomático consistente y recursivo para la aritmética tiene enunciados indecibles. En particular, si los axiomas del sistema son enunciados verdaderos, puede exhibirse un enunciado verdadero y no demostrable dentro del sistema. (Martínez – Piéiro, 2009, p. 22).

En su segundo teorema, el de consistencia, constituye un caso particular del primer teorema referida a los números naturales y la aritmética. Mediante ambos, se llega a la forma general del Teorema de Gödel: Todo sistema axiomático recursivo y consistente

que contenga suficiente aritmética tiene enunciados indecibles. En particular, la consistencia del sistema no es demostrable dentro del sistema. (Martínez – Piéiro, 2009, p. 25).

Lo que nos está indicando Gödel es que, si dentro de un sistema los axiomas y los supuestos de la matemática tradicional son compatibles entre sí (es decir que no se contradicen) no todo puede probarse o refutarse partiendo de ellos, por lo tanto, existe una insuficiencia dentro de cada sistema axiomático.

Por otro lado, toda la teoría matemática basada en la axiomática, se había desarrollado teniendo como principio irrefutable la completud de los conceptos, es decir: ante el surgimiento de una nueva problemática, que no podía resolverse con los conceptos existentes, siempre era posible formular otro concepto que resolviese el problema sin contradecir la teoría existente. Gödel, con sus teoremas contradice este precepto.

En palabras de Gödel:

El progreso de la matemática hacia una exactitud cada vez mayor ha llevado a la formalización de amplias partes de ella (...) Los sistemas formales más amplios construidos hasta ahora son el sistema de Principia Mathematica y la Teoría de Conjuntos de Zermelo-Fraenkel (...) Resulta por tanto natural la conjetura de que estos axiomas y reglas basten para decidir todas las cuestiones matemáticas que puedan ser formuladas en dichos sistemas (...) no es así, sino que por el contrario, en ambos sistemas hay problemas relativamente simples de la teoría de los números naturales que no pueden ser decididos con sus axiomas (y reglas). (Gödel, 1981).

Con estos teoremas, el sistema racional y absoluto por excelencia, creado a partir del mundo de las ideas de Platón y sistematizado por Euclides, estaba en crisis. Dios había muerto y el símbolo científico de la razón indiscutible, la matemática con la claridad que le otorgaba la lógica y la razón, agonizaba.

Roger Penrose, físico matemático, afirmó en 1989 que la geometría que nos fue transmitida por Euclides describe con gran exactitud el espacio físico del mundo en que vivimos, pero no es una necesidad lógica; es sólo una característica (aproximadamente exacta) observada del mundo físico.

El hecho de que la geometría euclidiana parezca tan precisa para reflejar la estructura del “Espacio” de nuestro mundo nos ha engañado haciéndonos pensar que esta geometría es una necesidad lógica, o haciéndonos pensar que tenemos una intuición innata “a priori”, de que la geometría euclidiana debe aplicarse al mundo en que vivimos. (Penrose. 1989, p. 145).

En la exposición de 1988 del MoMA, la arquitectura con su lenguaje transgresor de la física newtoniana y la geometría euclidiana aludió a lo mismo que Gödel con sus teoremas: lo que creíamos perfecto no lo es, lo que creíamos irrefutable, tampoco.



Fig. 134: Ufa-Palast en Dresde, de Coop Himmelbau
Fuente: <https://tecnne.com/arquitectura/ufa-cinema-coop-himmelblau/>

La Arquitectura moderna había hecho todo lo posible por mantener la jerarquía de una geometría y una física ya en crisis. Se podría llegar a pensar que, ante tanta irracionalidad social, como la vivida en las primeras décadas del siglo XX, alguna seguridad se intentaba conservar.

El gran exponente de la modernidad fue el CIAM (Congreso Internacional de Arquitectura Moderna), pero éste se disolvería en 1959. Posiblemente, las ideas allí elaboradas padecían de la simplicidad que impone la escasez de variables (la modernidad se manejó con forma – función – estructura) siendo que ya había aparecido la Teoría de

los Sistemas, a lo que debemos sumar que estaba a punto de nacer la Teoría del Caos y los escritos de Derrida.

Si bien el Deconstructivismo fue un primer paso hacia el abordaje del hecho arquitectónico y urbanístico desde la complejidad, al expresarse contrario al “Movimiento Moderno”, estableció la ruptura de cánones imperantes y sus jerarquías, buscando la justificación de sus obras fuera del ámbito de la arquitectura misma: filosofía, psicología, biología, entre otros temas; la geometría utilizada estaría en función de la arquitectura misma. Fue el principio de una búsqueda, pero todavía faltaba la tecnología suficiente que permitiese avanzar; los *software* de la época, eran de dibujo, no de diseño.

PARTE III: INCERTIDUMBRE

III.1. COMPLEJIDAD

Hasta el momento, en esta tesis, se ha desarrollado el modelo científico, que se originó con Copérnico y Galileo basado en la geometría euclídea y el álgebra lineal, llegando a su plenitud con Descartes, Leibniz y Newton, sirviendo de sustento para avances científicos y tecnológicos venideros.

A partir del siglo XX, los nuevos enfoques y desarrollos de la ciencia y la reflexión epistemológica, encontraron al modelo científico desarrollado hasta ese momento insuficiente e inadecuado para simbolizar o modelizar las realidades que se iban presentando, ya sea en el mundo subatómico de la física, como en el de las ciencias de la vida y en las ciencias sociales.

En ese proceso, presenciamos el desprestigio de la ciencia determinista, lineal y homogénea, junto al surgimiento de una ciencia con variables tales como incertidumbre, aleatoriedad, no linealidad y pensamiento sistémico, capaz de darnos explicaciones globales y unificadas. Nos encontramos ante un nuevo paradigma, una nueva forma de leer al cosmos; un nuevo paradigma científico que debió generar sus modelos de interpretación del universo, partiendo de seres humanos que no pudieron resolver determinados problemas con los modelos existentes. Nace el paradigma de la complejidad.²⁰

Un cambio de paradigma no solamente atañe a los fundamentos del conocimiento científico; en general, nos encontramos ante una crisis de los fundamentos del pensamiento, abarcando el modo de ver al universo con sus estructuras, creencias, supuestos, valores; una nueva forma de ver y percibir.

Desarrollos teóricos en el terreno de la informática, la cibernética, la ecología, la biología, la química, las neurociencias, la antropología, la ciencia política, el estudio de organizaciones sociales y las matemáticas con temas tales como, los modelos biológicos,

²⁰ En castellano, la palabra *complejo* aparece en 1625, con su variante *complexo*, viene del latín *complexus*, que significa “que abarca”, participio del verbo *complector* que significa “yo abarco, abrazo”. De *complejo* se deriva *complejidad* y *compleción*. Por otro lado, esta última palabra, que aparece en el castellano alrededor del año 1250, proviene del latín *complexio* que significa “ensambladura o conjunto, pero sin anular su dualidad”.

la teoría de las catástrofes, la teoría del caos, la lógica difusa, la geometría fractal y las geometrías complejas, han confluído hacia la formulación de una nueva cosmovisión.

La complejidad entiende las situaciones de la realidad como una totalidad compuesta, en la que intervienen múltiples componentes entrelazadas y vinculadas entre sí. En esa totalidad compuesta se perderán ciertas propiedades de las variables constitutivas, pero aparecerán cualidades “emergentes” que no estaban presentes en las partes vistas aisladamente.

Es decir, complejidad no es sinónimo de complicado, sino de inclusión e interrelación de variables constitutivas de un hecho, tanto intrínsecas al sistema que lo constituye como las generadas con el sistema que lo incluye. Llevar adelante esta concepción, le implicó al paradigma generar la tecnología que le permitiese crecer y establecerse; basándose en esos nuevos conocimientos, afianzó el sistema sociopolítico, cultural y científico contemporáneo, complejizándolo aún más.

Abordar bajo este paraguas a la arquitectura exigirá la negación de protegerse detrás de las seguridades impuestas a la obra mediante las tipologías o la simple relación forma – función – estructura; se necesitarán multiplicidad de variables con sus interrelaciones e impredecibilidades. La complejidad arquitectónica se expresa en las obras donde las estrategias de diseño se imponen a rígidos programas, en búsqueda de multiplicidad de soluciones, derivadas de la dependencia sensible de variables (entendida según la teoría del caos), tarea que implica la trans y multidisciplinariedad.

La teoría de la complejidad emergió, para Wolfran (*New Kind of Science*. Wolfram Media, Champaign 2002), como tendencia científica dominante en la década de 1990; Edgar Morin (1921), por su parte, basándose en el pensamiento sistémico, la cibernética y la teoría de la comunicación acuñó el término “pensamiento complejo” que incluye la incertidumbre y la organización. En 1997, en la Universidad El Bosque (UB), Bogotá, Colombia, se creó el primer seminario de América Latina, referido a las Ciencias de la Complejidad, que sigue en actividad actualmente, siendo Carlos Maldonado un referente de éste.

Con el fin de contextualizar la arquitectura compleja de las teorías y enfoques de los que deriva, se desarrollará a continuación, el pensamiento complejo y las Ciencias de la Complejidad.

PENSAMIENTO COMPLEJO

El pensamiento complejo aspira a un conocimiento multidimensional, pero implica el reconocimiento de un principio de incompletitud e incertidumbre²¹. Esta aseveración de Morín se opone al pensamiento de la simplificación, el cual se basó en tres principios en los que se sustentó la ciencia tradicional:

1. El principio del determinismo universal, que sin tener en cuenta la aleatoriedad, ni la impredecibilidad, ni el hecho de que el efecto pueda modificar a la o las causas, postula que el futuro puede llegar a ser predecible, esta es la causa del nacimiento de la estadística, conocer el futuro.
2. El principio de reducción, que consiste en conocer cualquier compuesto a partir del conocimiento de las partes básicas que lo constituyen, aisladamente.
3. El principio de disyunción, que atiende a la separabilidad de las disciplinas sobre los problemas cognitivos.

Estos principios dieron lugar a una ciencia antropocéntrica, basada en absolutos y fragmentada. La arquitectura, no ajena a ello, se expresó mediante la rigidez de las tipologías, utilizando geometrías euclidianas y desarrollos físico – matemáticos que no incluían, ni al tiempo, ni al movimiento, ni al sujeto, pero en concordancia con la cosmovisión del momento en que se desarrollaba el proyecto. El pensamiento que rige el *paradigma de la complejidad* cuestiona estos valores de la racionalidad con el fin de modificarlos.

Durante el siglo XX, en las ciencias, aparece la necesidad de la conciencia del sujeto que forma un todo con el objeto y el universo en sí, lo que supone una visión holística y sistémica, donde, por añadidura, la causa puede modificar al efecto, en retroalimentación constante.

Todavía en Bruno Zevi encontramos una visión estática de la arquitectura basada en el determinismo “causa – efecto” ya que no considera la retroalimentación “sujeto – objeto” donde cada uno incide en el otro.

²¹ Edgar Morin (1988). “El pensamiento complejo”. Editorial Gedisa, España 1998.

La arquitectura no es solamente un arte, no es solamente la imagen de horas pasadas, vividas por nosotros y por los otros: es sobre todo la escena, el cuadro donde se desarrolla nuestra vida. (Zevi, 2004, p. 32).

Zevi simplemente considera a la arquitectura como un escenario donde se desarrolla lo cotidiano, siendo que la complejidad de la cotidianeidad, con sus componentes sociopolíticos, culturales, relacionales, perceptuales y emotivos, no pueden acontecer en un simple cuadro estático. Se necesita la complejización del espacio en correspondencia con la complejidad del que lo habita, asumiendo la impredecibilidad, el tiempo, el dinamismo y la aleatoriedad que conlleva el todo.

Al mismo tiempo, al considerar al ser humano como una variable más de su entorno social, ambiental y económico, dará el lugar al concepto de sustentabilidad.

Pensamiento complejo: sustentabilidad y arquitectura.

Al considerar el pensamiento complejo a todo acontecimiento en sus interrelaciones con el sistema externo a él que lo involucra, no se lo puede aislar de su entorno cultural, social, económico, político y natural, intentando modificar las condiciones existentes; por lo cual, la ciencia y la tecnología utilizada para el abordaje de las temáticas deberá tomar en cuenta el medio ambiente y los problemas político – económico – sociales, generados tanto en el desarrollo científico que condujeron a la sociedad fordista, como a los nuevos avances científico – tecnológicos. La arquitectura, deberá hacerse cargo de ello.

Este concepto de Morin aparece en un documento publicado por las Naciones Unidas y redactado por la Comisión Brundtland en 1987, titulado originalmente “Nuestro futuro común”, en el que definía el desarrollo sostenible como “(...) aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”.

Esta postura supone tomar en cuenta tres componentes para el desarrollo: el social, el ambiental y el económico, con sus interrelaciones, enfrentando al desarrollo y al consumismo, tal como se venía desarrollando, con nuevas teorías y tecnologías que permitiesen considerar multiplicidad de variables al encarar cualquier planificación y/o proyecto complejizando el hecho arquitectónico al sumarle variables para su generación y concreción, corriendo al ser humano de la posición central y dominante; la producción arquitectónica no podrá independizarse del todo.

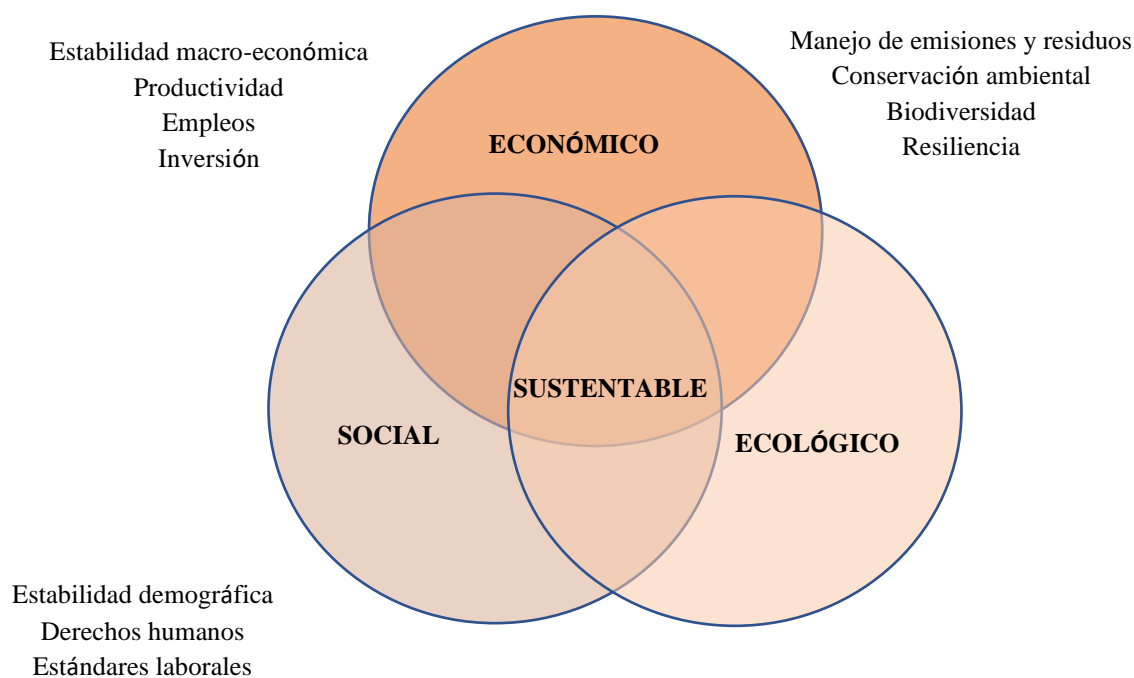


Fig. 135: Diagrama de componentes del desarrollo sustentable
Fuente: elaboración propia

Desarrollo sustentable

Las nuevas tecnologías permitieron, precisamente, la inclusión de multiplicidad de variables surgidas de las necesidades espaciales, constructivas, urbanísticas, sociales, ambientales y financieras del proyecto, con sus correspondientes y múltiples interrelaciones; es decir, se comienza con un abordaje del proyecto desde la sustentabilidad y en donde los algoritmos utilizados para el abordaje de todo el proceso arquitectónico, incluirán además, la aleatoriedad, las contingencias y la incertidumbre.

El proyecto arquitectónico, como forma compleja de actividad, es uno y diverso, analítico y sintético, concluso e inconcluso, suficiente e insuficiente, trata de fenómenos multidimensionales, de lo puntual y de lo general, de lo conceptual y de lo concreto, del todo y de las partes... tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen el mundo fenoménico. (Morin, 2004, p. 34).

Los enfoques contemporáneos del diseño arquitectónico han abandonado el determinismo de las prácticas tradicionales, al igual que las exclusivas búsquedas formales basadas en composiciones geométricas; en cambio, han abrazado los parámetros de sustentabilidad

y optimización, junto a la *indeterminación* que suponen los nuevos procesos digitales de concepción. En lugar de trabajar con un *partido*, el diseñador construye un sistema generativo de producción formal, basado en la información obtenida de las interrelaciones entre variables, incluido el tiempo, para después someterlo a deformaciones en búsqueda de la optimización.

El papel generador de las nuevas técnicas digitales se lleva a cabo a través de la interpretación del diseñador y la manipulación simultánea de un conjunto computarizado (superficies topológicas, campos isomorfos, esqueletos cinéticos, campo de fuerzas, modelos paramétricos, algoritmos genéticos, etc.) a través de un proceso complejo que requiere continuamente la reflexión del diseñador en la toma de decisiones ante la diversidad de respuestas del sistema ante las distintas problemáticas.

Tanto los sistemas generativos como la inclusión de la transformación de las formas en el diseño requieren de sistemas matemáticos no lineales. Los sistemas no lineales producen respuestas inesperadas pues se basan en la red de interrelaciones de las partes constitutivas y su variación en el tiempo.

Por añadidura, en estos sistemas no lineales, la adición o sustracción de un tipo particular de información puede afectar su comportamiento, es decir, un pequeño cambio cuantitativo puede producir un efecto cualitativo desproporcionadamente grande denominado “dependencia sensible”, siendo los medios digitales los que permiten el acceso a los mencionados sistemas de organización dinámica, no lineal e indeterminados, provocando un amplio abanico de posibles resultados.

III.2. ANTECEDENTES DEL PENSAMIENTO COMPLEJO Y SU INCIDENCIA EN LA ARQUITECTURA.

El recorrido que sigue está orientado a expresar la inseparabilidad de la matemática y el espacio complejo. Tres teorías permitieron enunciar la teoría del Pensamiento Complejo:

- La teoría de los sistemas
- La cibernética
- Las teorías de la información y la comunicación

Según Morin: “(...) la palabra complejidad no venía a mi mente, hizo falta que lo hiciera, a fines de los ‘60, vehiculizada por la teoría de la información, la cibernética, la Teoría de los sistemas y el concepto de autoorganización” (Morin, 1994, p. 23).

TEORÍA DE LOS SISTEMAS

En 1950, el biólogo, Ludwig Von Bertalanffy planteó la “Teoría General de los Sistemas”, donde propuso la perspectiva sistémica como un tipo de explicación que integra aspectos imposibles de integrar por la explicación mecanicista, tales como, la relación de adaptación de un organismo con su entorno, el dinamismo y los cambios de ese organismo o las propiedades emergentes del mismo. (Morin, *Ibidem*).

En 1954, junto al economista Kenneth Boulding funda la *International Society for General Systems Theory* (ISGST), organismo que más tarde se convirtió en la *International Society for Systems Science* (ISSS). Dentro de esta organización se planteó el desarrollo de isomorfismos entre conceptos, leyes y métodos que podían trasladarse de un campo del conocimiento a otros. Es decir, se investigaron los principios generales en fenómenos tratados de forma específica por diferentes áreas del conocimiento.

La Teoría de los Sistemas, según Bertalanffy, representa un amplio punto de vista que trasciende en gran medida los problemas y los requerimientos tecnológicos, una reorientación que se ha vuelto necesaria en la ciencia en general, en toda la gama de disciplinas que va de la física y la biología a las ciencias sociales y del comportamiento y hasta a la filosofía.

Esta teoría contribuyó a la aparición de una nueva forma de pensar las disciplinas ya sin compartimentos estancos y basadas en la interrelación entre los elementos que forman los sistemas. Distintas corrientes de pensamiento del siglo XX aceptaron que el todo no puede comprenderse desde el estudio aislado de las partes y que sólo puede ser analizado desde el estudio de la interacción de sus elementos constitutivos. Se reemplaza la concepción todo/partes por la concepción sistema/entorno, siendo el entorno un sistema en sí mismo que incluye al primero.

El pensamiento sistémico propone pensar en términos de conectividades, relaciones y contextos, como contrapartida al pensamiento analítico. En última instancia conduce a pensar que no hay partes en absoluto. El entorno deja de ser un factor condicionante de la construcción del sistema para pasar a ser un factor constituyente de ella. (Morin, 2002, p. 16).

Lo sistémico hoy se constituye más ampliamente, en un enfoque, una visión o una manera de pensar. Las propiedades de las partes sólo pueden ser comprendidas en el contexto de un conjunto mayor.

Bertalanffy entendía que su teoría implicaba un cambio de paradigmas en la ciencia. Afirmaba que este cambio consistía en el paso del reduccionismo cartesiano a la comprensión holística de un todo que es más que la suma de sus partes aisladas (Rodríguez y Arnold, 1991). La arquitectura y el urbanismo se harán cargo de ello.

En esta teoría, los sistemas se pueden dividir en función de su nivel de complejidad. Los distintos niveles de un sistema interactúan entre sí, estableciéndose dependencia entre ellos.

Tal como aseveró Morin (2002), todo sistema se encuentra conformado por "subsistemas" organizados que desarrollan sus funciones específicas y se halla en interacción con un medio ambiente, o "suprasistema", respecto al cual él desempeña el papel de subsistema.

Teoría de los sistemas y arquitectura tradicional.

En la década de 1950, las ideas provenientes de la teoría de sistemas incitaron a crear proyectos vanguardistas que se oponían al planteamiento determinista de la Arquitectura

moderna, en la cual varias de sus corrientes entendían al objeto arquitectónico como un objeto aislado.

El *Team 10*, grupo formado en el ámbito del noveno congreso CIAM (Congreso Internacional de Arquitectura Moderna) en Aix-en-Provence (1953), se opuso al planteamiento de la arquitectura representada por Le Corbusier y Gropius; y refuta temas de la Carta de Atenas (1933) tales como: fragmentación de la ciudad en zonas funcionales compartimentadas (habitar, circular, trabajar, recrear) y propuso, en su lugar, una visión sistémica de la ciudad. El *Team 10* no rechazaba la idea de función, como rectora de la arquitectura y la ciudad, pero reivindicaba el protagonismo de las personas.

En el “Manifiesto de Doorn” (1954), por ellos elaborado, afirmaba que un edificio interpretado funcionalmente sólo podía ser útil si se consideraba en el contexto de la comunidad. La ciudad se entendía como una totalidad compleja formada por comunidades autónomas que, a su vez, se articulaban a partir de las relaciones entre las personas más que de funciones preestablecidas. En otras palabras, la ciudad era mayor que la “suma de sus partes”. Para ello, el equipo analizó los principios estructurales del crecimiento de la ciudad, que comenzaba con la agregación de células familiares (casas), para dar paso a la creación de la calle (lugar de encuentro social), al distrito y finalmente de la ciudad, según “umbrales sucesivos. Para el *Team 10* la ciudad debía pensarse a partir de la relación de las personas con la vivienda, la calle, el distrito y la ciudad; siendo éstos los patrones asociados al ser humano.

Concepciones de la Teoría de los Sistemas en la Arquitectura Compleja.

La arquitectura ha incorporado el pensamiento sistémico y en la actualidad estos conceptos se encuentran implícitos en la complejidad de las obras de arquitectura y urbanismo.

Consideremos por ejemplo, los conceptos de subsistemas y suprasistemas de la Teoría de Bertalanffy para luego verificarlos en una obra de arquitectura contemporánea.

Según esta teoría, todo sistema se encuentra constituido por "subsistemas" organizados que desarrollan sus funciones específicas; a su vez, estos subsistemas interactúan con un "suprasistema" que los contiene.

Terminal Internacional de Pasajeros de Yokohama.

Veamos que ocurre con estos conceptos en la Terminal Internacional de Pasajeros de Yokohama.

Si bien la Terminal conforma un sistema constituido por subsistemas, ésta se constituye a modo de subsistema interactuando con el mar y la ciudad; el suprasistema.

FOA no utilizó este equipamiento urbano como un límite entre la ciudad y el mar, a pesar de serlo geopolíticamente, sino que lo constituyó en nexo entre ambos. En vez de formar una puerta urbana, como muchas de las terminales internacionales, los arquitectos propusieron una organización en la que el edificio se convirtiera en una topografía, transformando la terminal en una superficie plana y oblonga, es decir convirtiendo al edificio en parte del suelo, una superficie envolvente.



Terminal de Pasajeros de Yokohama

A la izquierda Fuente: <http://arquitecturaespectacular.blogspot.com/2010/03/terminal-yokohama.html>

A derecha fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/628249/clasicos-de-arquitectura-terminal-internacional-de-pasajeros-de-yokohama-foreign-office-architects-foa>

El objetivo fue convertir la Terminal, “ *en una interfase entre el océano abierto y el denso conglomerado que forman las ciudades de Tokio y Yokohama. La solución fue hacer un edificio achatado y ondulante en el que se confunden la planta baja, la terraza, el exterior y el interior.*

Se trata de una propuesta urbana. No es únicamente un edificio sino que es una parte fundamental de la ciudad, del espacio urbano”²².

²² <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-maritima-de-yokohama/>

La Terminal no tiene la imagen de un edificio tradicional. Es un muelle ondulado que se mete en el mar.

El subsistema Terminal, actúa como sistema de los subsistemas arquitectónicos que lo constituyen; entre ellos podemos mencionar las distintas configuraciones espaciales que incluye la terminal, la estructura circulatoria que contempla y una estructura resistente al servicio de la totalidad de variables, interactuantes a su vez, con el mar y la ciudad.

De esa forma, estructura, función, morfología y medio ambiente, entre otros, actúan como un todo indivisible, siendo el proyecto el emergente de las interacciones de variables y subsistemas.

Veamos las relaciones entre algunas variables.

Espacialmente, nos encontramos con una edificación donde las paredes se mezclan con el suelo, no existen columnas y el suelo se convierte en techo, cuando el interior pasa a ser exterior.

Su forma de suave lomada crece paulatinamente en altura a medida que se adentra en el mar. *“Así, las ondulaciones en la topografía constituyen el edificio, los límites se diluyen y el techo se pliega tomando distintas formas. La superficie del suelo se dobla sobre sí misma, formando pliegues que producen y contienen los caminos que atraviesan el edificio. El individuo se mueve en distintos planos.”*²³

El nivel superior de la terminal es una terraza de madera debajo de la cual se desarrollan las distintas actividades.

Dentro de este sistema espacial y a efectos de mantener un esquema circulatorio, se evitó sostener la estructura mediante columnas, definiéndose una superficie envolvente como elemento estructural en sí, colocando una superficie ondulada entre dos placas planas, similar a un cartón corrugado.

En La terminal de Yokohama la información tanto interna (el programa) como externa es tomada por el proyectista e incide tanto en la generación del proyecto como el hecho

²³ <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-maritima-de-yokohama/>

urbanístico mismo y representa una tipología emergente entre otras variables, de la infraestructura de transporte.

Estructura

A efectos de no afectar el esquema circulatorio se evitó sostener la estructura con columnas. Con el mismo fin se eliminaron escaleras, utilizando rampas.

Se definió a la superficie envolvente a modo de estructura, colocando una superficie ondulada entre dos superficies planas

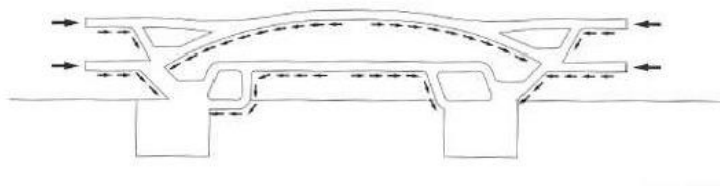


Fig. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/628249/clasicos-de-arquitectura-terminal-internacional-de-pasajeros-de-yokohama-foreign-office-architects-foa>

Sistema circulatorio

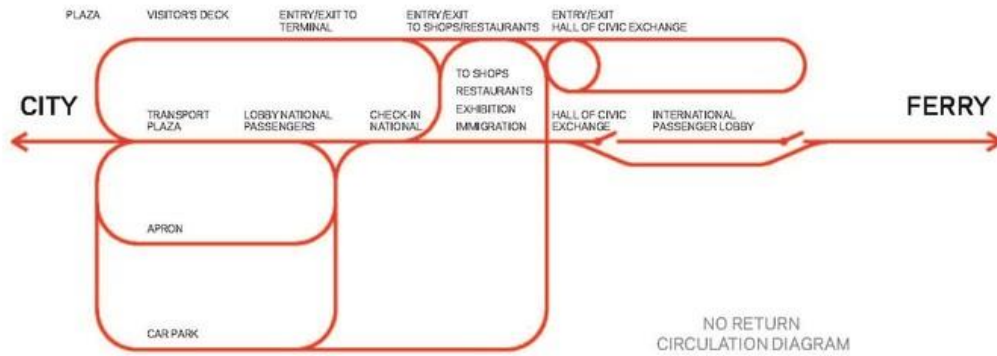


Fig: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/628249/clasicos-de-arquitectura-terminal-internacional-de-pasajeros-de-yokohama-foreign-office-architects-foa>

Espacio



<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/terminal-maritima-de-yokohama/>

La evolución y la fecundidad teórica de la concepción sistémica han sido amplias y diversas. Esos desarrollos se han gestado fundamentalmente por la ruta de los

intercambios con la cibernética y la teoría de la comunicación. Intercambios tan íntimos que, cada vez más, se suele tomar esta nueva concepción como una sola: la sistémico-cibernético-comunicacional.

CIBERNÉTICA

El gran desarrollo de la sistémica se encontró favorecido y acrecentado por las interrelaciones con la cibernética y la teoría de la comunicación, al punto de hablarse actualmente de la concepción sistémico – cibernético – comunicacional.

Norbert Wiener (1894-1964), matemático y filósofo norteamericano, publicó en 1948 *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*, sentando las bases de la Cibernética.

La Cibernética, nacida de la combinación de las matemáticas y la neurofisiología, se propone como la ciencia que permitirá el control del proceso mediante el cual los organismos vivos conservan cierto estado de organización dentro de la tendencia general del universo hacia la corrupción y la decadencia, tendencia que se conoce con el nombre de *entropía*.

La *entropía* es la medida de la probabilidad de encontrar respuesta, en un conjunto más grande de universos posibles, a las preguntas que podemos hacernos acerca de algunos de ellos (Wiener, 1988a, p. 14).

Dicho más simplemente, “la entropía mide el nivel de desorganización y homogeneidad de un determinado sistema” (Wiener, 1988a, p. 34). A menor entropía, mayor diferenciación; a mayor entropía, mayor homogeneidad. Wiener creía que a medida que aumentaba la edad del universo aumentaba la entropía y, por extensión, la homogeneidad entre los elementos que lo constituyen.

Wiener insta una relación entre los seres vivos y las máquinas estableciendo una analogía entre sistemas vivientes, organismos y los sistemas físicos, es decir las máquinas. Hizo extensivo a cualquier sistema, incluido el cerebro, los conceptos de información, retroalimentación y control que tenían aplicación específica en la ingeniería; de esta forma la cibernética se instaló como el estudio de la comunicación y del control en general. La arquitectura no quedaría excluida de esta concepción, como veremos más adelante.

La cibernética puso en evidencia que muchas funciones humanas se basan en procesos mecánicos y cíclicos que se rigen por la retroalimentación. Esto permitió investigar su funcionamiento por medio de la máquina.

Las máquinas cibernéticas son *sistemas cerrados organizacionalmente y abiertos informacionalmente*, reciben información de parte del entorno y actúan sobre éste. En realidad, Wiener propuso una posición similar a la de Bertalanffy, en el sentido de que la información se concibe en términos de *inputs* y *outputs*.

En realidad, la cibernética es una *ciencia interdisciplinar*, estando ligada tanto a la física como al estudio del cerebro y de las computadoras; también tiene mucho que ver con los lenguajes formales de la ciencia, proporcionando herramientas a efectos de describir de manera objetiva el comportamiento de estos sistemas.

En la cibernética, los conceptos de control y comunicación están estrechamente relacionados entre sí. La comunicación implica la transmisión de información en forma de mensajes. Cuando la comunicación tiene lugar entre máquinas, la función del mensaje es la de controlar su funcionamiento. Cuando la comunicación se realiza entre seres humanos, su función es transmitir un significado.

Relaciones entre cibernética y Arquitectura.

Podemos considerar a la obra de arquitectura, al igual que las máquinas cibernéticas como un sistema *cerrado organizacionalmente y abierto informacionalmente*; dicho de otro modo, la obra de arquitectura es un sistema que recibe información de parte del contexto, la organiza y actúa sobre él.

De acuerdo con el pensamiento cibernético, el conjunto forma-entorno constituye en sí mismo un sistema. En el ámbito de la arquitectura se empleó el término “contexto” para referirse al entorno como el conjunto de los condicionantes específicos de la configuración de la obra.

Gordon Pask, 1969, relaciona el mundo digital con la arquitectura, en su artículo, “*The Architectural relevance of cybernetics*”, en el cual se anticipa en el tiempo a la estrecha relación que se establecería, décadas después, entre lo digital y la arquitectura, aunque en la década del `60 no se hablara de lo digital, sino de cibernética. En dicho

artículo expresa: que resulta fácil alegar que la cibernética es significativa para la arquitectura (Pask, 1969).

John Frazer, refiriéndose al escrito de Pask, declara: “El autor de este texto se avanza unos 25 años al papel que el *software* y el *hardware* van a tener en la *modelización de los procesos naturales complejos*” (Frazer, 1995, p. 9).

Existe en Pask una visión holística de la arquitectura por lo cual la vincula estrechamente con la cibernética por su característica organizacional e informacional.

Su fundamento para tal vinculación reside en la convicción de que un edificio sólo tiene significado si no lo tomamos aisladamente. Su sentido deviene de la interacción con el ser humano y del hecho de constituir una parte de un sistema mayor.

Para Pask, que sostiene una visión holística y totalizadora de la arquitectura, los arquitectos y las arquitectas son, ante todo, proyectistas de sistemas que se han visto forzados a interesarse por las propiedades organizativas de los sistemas de desarrollo, comunicación y control, hallando en la cibernética el instrumento que les permitiría la unificación y organización de los sistemas.

Al hablar de visión holística, Pask refiere específicamente a pensar la arquitectura en el contexto de la ciudad, considerando su extensión en el tiempo, inmersa en un plan y respondiendo a su entorno, mientras que, cuando refiere a contexto, toma en consideración el tiempo y la inmersión del proyectista en una realidad determinada.



Fig. 136: *The Colloquy of Mobiles*.

Fuente: <https://axonometrica.blog/2014/11/03/la-irrupcion-digital-de-la-arquitectura>

La figura 136 corresponde refiere a la obra de Gordon Pask, para la exposición *Cybernetic Serendipity* realizada en el ICA de Londres en 1968. La pieza consistía en cinco móviles coordinados por un ordenador. Los cinco móviles colgados del techo empezaban a interactuar, afectados por la incidencia de la luz o el sonido,

Autoorganización, cibernética y Arquitectura.

La noción de sistema, cuyo funcionamiento deriva de la interacción dinámica y cambiante de las variables constitutivas, da lugar a un número de propiedades que pueden ser entendidas como aspectos diferentes del principio de autoorganización.

La autoorganización de un sistema implica que es el mismo sistema el que establece el orden de su estructura y funciones, interactuando con el entorno. Es una característica de los sistemas complejos que les permita *coordinar y sincronizar todos sus procesos de manera autónoma*.

La primera aparición del término *autoorganización* surgió en 1947 en unos papeles del psiquiatra William Ross Ashby y rápidamente fue adoptado por todos aquellos asociados a la teoría de sistemas en la década de 1960, inclusive adoptado por los investigadores de sistemas complejos en la década de los setenta.

El concepto de autoorganización está ampliamente ligado al concepto de cibernética y este íntimamente relacionado con la Teoría General de Sistemas. Sin embargo, la Cibernética está más orientada al estudio del mando, el control, las regulaciones y el gobierno de los sistemas, es decir, los mecanismos que permiten a un sistema mantener su equilibrio dinámico y alcanzar o mantener un estado.

La Cibernética, en definitiva, es el estudio interdisciplinar de la estructura reguladora de los sistemas tanto físicos como sociales.

En palabras de William Ross Ashby: “(...) lo que la cibernética ofrece es un marco donde todas las máquinas individualmente pueden ser ordenadas, categorizadas y entendidas”. (Ashby, 1956, p. 2).

Desde el punto de vista de la arquitectura y el urbanismo, aceptando la estrecha relación entre autoorganización y cibernética, siendo esta última relevante en el estudio de la acción del entorno sobre el proyecto y la respuesta de éste a dicha información (*feedback*),

queda claro el protagonismo que ha adquirido el concepto de autoorganización en la arquitectura y el urbanismo, dejando en evidencia el carácter complejo de estas disciplinas, dotadas de impredecibilidad por constituir las ciudades sistemas abiertos y dinámicos, por lo tanto tendientes a una autoorganización.

En función de su desarrollo teórico, Ashby establece un paralelismo entre cibernética y geometría y de esta última con el espacio.

La posición de la cibernética en relación a una máquina real, electrónica, mecánica, neuronal o económica, es parecida a como la geometría se posiciona en relación a un objeto real en nuestro espacio terrestre (...) Hoy La geometría existe por derecho propio y por su propia fuerza. Hoy es la geometría la que contiene las formas terrestres, y no viceversa, en tanto que estas formas terrestres son meramente casos especiales del amplio espectro que abarca la geometría (...) A este crecimiento del entendimiento de la geometría le ha correspondido un aumento del poder de control. (Ashby, 1956, p. 2).

Es precisamente esa nueva identidad geométrica la que posibilitará, junto a las nuevas tecnologías de concreción, una configuración espacial compleja.

En correspondencia con estas nociones de geometría y sistemas dinámicos, aparecen exponentes en arquitectura, tales como: el ya mencionado *Team 10*, Yona Friedman, Kenzo Tange y el grupo *Archigram* que pensarán a la arquitectura y a la ciudad como un sistema dinámico, es decir una organización literalmente cambiante en el espacio y tiempo que negaba la forma estática y era capaz de adaptarse a las exigencias de sus usuarios.

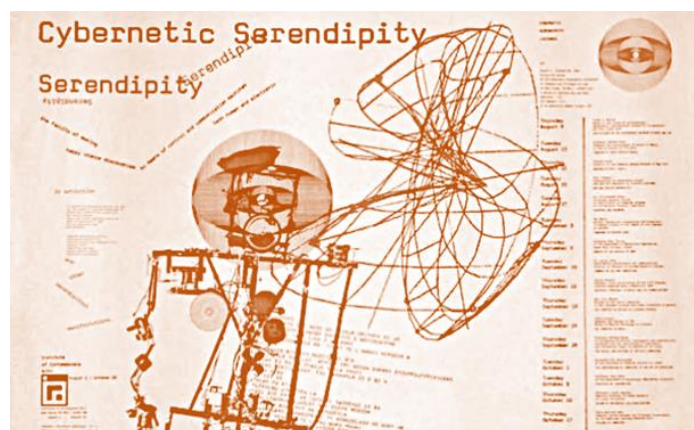


Fig. 137: Cartel de apertura de la exposición *Cybernetic Serendipity* inaugurada en el ICA de Londres en 1968 y comisariada por Jasia Reichardt.

Fuente: <http://www.medienkunstnetz.de/exhibitions/serendipity>

TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN Y ARQUITECTURA DIGITAL.

En 1936, Alan Turing (1912 – 1954) ideó el esquema de una máquina capaz de vincular información con símbolos, posteriormente, Claude Shannon (1916 – 2001) matemático, ingeniero eléctrico y criptógrafo junto a Warren Weaver (1864 -1994) concluyen, en 1949, con la elaboración de la Teoría Matemática de la Comunicación donde se ocupan de entender los aspectos más técnicos de la transmisión del mensaje, definiendo las bases de una teoría pensada en función de la cibernética que pasaría a denominarse “Teoría de la Información.”

La teoría de la comunicación, con base en la teoría de las probabilidades y las ciencias de la computación estudia todos los componentes de la información. Por su parte la base matemática de la teoría de la información se remonta al año 1854 con el Álgebra Booleana de George Boole (1815 – 864), aunque surge como tal a finales de la Segunda Guerra Mundial y es dada a conocer por Claude E. Shannon (1949 – 2001) a través de un artículo publicado en el *Bell System Technical Journal* en 1948, titulado “Una teoría matemática de la comunicación”.

El álgebra booleana es una rama del álgebra que se usa principalmente en informática; es un método para simplificar los circuitos lógicos en electrónica digital, denominándose "Diagramas de decisión binarios" a las funciones booleanas, dado que esta álgebra permite sólo dos estados en un circuito lógico, como Verdadero y Falso, Alto y Bajo, Sí y No, Abierto y Cerrado ó 0 y 1.

Esta teoría -que está relacionada con las leyes matemáticas que rigen la transmisión y el procesamiento de la información- se ocupa de la medición de la información y de la representación de la misma y la capacidad de los sistemas de comunicación para transmitir y procesar información, definiendo que “el objetivo de un sistema de comunicación consiste en asegurar entre una fuente de información y un destinatario, una relación mediante la cual la primera afecte la conducta del segundo”. (Garretón, 1975, p. 11).

Los procesos cibernéticos de control y comunicación que tenían inicialmente aplicación en el campo de la tecnología se extendieron a distintos campos del conocimiento.

Las teorías científicas que acabamos de enunciar tienen su correlato sociopolítico – cultural en los años sesenta donde se sentaron las bases de la sociedad actual, inaugurando

la era postindustrial. Es en esa década donde aparece una realidad multifacética en la que ya no es posible una visión lineal de los hechos, ni una lectura secuencial de la historia y la sociedad.

Durante la década del '70, con base en las teorías expuestas, sobresalieron dos vertientes que definían el significado de contexto en el ámbito arquitectónico, a efectos de comprender la información brindada por dicho contexto y su incidencia en la obra misma.

El arquitecto y matemático Christopher Alexander (1936) junto al arquitecto y educador John Habraken (1923) definieron el contexto como los hábitos de un cierto lugar que dan paso a formas cuyas propiedades dependen de la experiencia individual de uso del espacio. Por su parte Aldo Rossi y Robert Venturi entendieron el contexto como el continente de valores simbólicos, tanto en su acepción histórica como vernácula.

Ambos interpretaron la forma como un lenguaje basado en símbolos o códigos, cuyo fin era la experiencia estética. Alexander y Habraken dieron origen a un sistema basado en el control, a efectos de responder a la demanda o necesidades del usuario; mientras que los sistemas generados por Rossi y Venturi tenían como propósito la comunicación, por lo cual se facilitaban los intercambios entre el edificio y el usuario.

Este intercambio se basa en las interrelaciones de información del edificio con su entorno. En este punto se podría establecer una analogía biológica con los conceptos de genotipo y fenotipo. El genotipo refiere a la constitución genética completa de un individuo y el fenotipo, implica la expresión del genotipo en un medio determinado.

En biología, hablar de información no es otra cosa que hablar del ADN. Estévez, en su ponencia del SiGraDI del 2008, "Genética y cibernética en Arquitectura", destaca las

(...) potencialidades que tiene el mundo natural si se trabaja con ADN como si fuese un software natural, y las grandes posibilidades que tiene el mundo digital si se trabaja con software como si fuese un ADN digital (...) Su fusión lleva a la arquitectura biodigital y al organicismo digital, a consolidarse estos años como una auténtica vanguardia del siglo XXI. (Estévez, 2008, s/p).

Al igual que otras Ciencias de la Complejidad, la cibernética fue creada por el paradigma ante la necesidad de nuevos métodos de abordaje para enfrentar la problemática de la organización compleja.

III.3. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

Carlos Maldonado (1963), es uno de los mayores referentes latinoamericano, en investigación y teoría de las Ciencias de la Complejidad; él afirma que: “Cuando hablamos de Ciencias de la Complejidad, no simplemente hablamos de sistemas, fenómenos o comportamientos complejos: sino, más exactamente, de sistemas (fenómenos y/o comportamientos) de complejidad creciente”. (Maldonado & Gómez Cruz, 2011, p. 9)

Como ya se desarrolló, la ciencia tradicional se basa en la búsqueda de certezas que le permita establecer una causalidad determinista que reviste con seguridades la construcción de una realidad estructurada en las certidumbres y la linealidad conceptual. Todos aquellos acontecimientos que no respondieran a los modelos establecidos dentro de este paradigma, se los califica de simples hechos azarosos, pero en 1903, Henri Poincaré (1854 – 1912) enunciará que el azar no es más que la medida de la ignorancia del hombre.

Las Ciencias de la Complejidad constituyen un grupo de ciencias que se ocupa del estudio de una realidad cambiante e impredecible. En el actual panorama, el empleo de las lógicas tradicionales se declara incompetente para el estudio de determinados sucesos.

Estas ciencias con diversidad de teorías, conceptualizaciones y modelizaciones, estudia las distintas “fases”²⁴ de los sistemas que no pueden explicarse con el álgebra o el análisis matemático tradicional, ni se pueden modelizar mediante la geometría euclidiana de tres dimensiones; es decir, no se ocupan de los sistemas dinámicos lineales cuyas fases predecibles pueden ser descritas por la matemática clásica. Por ejemplo, las fases del ciclo del agua.

La complejidad se centra en los sistemas dinámicos caóticos, cuyas fases solo pueden ser descritas por *atractores fractales, también llamados extraños*²⁵, generando nuevas organizaciones a través del comportamiento caótico de sus componentes, preguntándose por qué el orden se rompe, pero también, cómo es posible generar un nuevo orden a partir del desorden.

²⁴ Se entiende por fase los distintos estados por los que atraviesa un sistema.

²⁵ Siendo un atractor la entidad hacia la que fluyen las trayectorias de las distintas y posibles entidades dentro de los distintos sistemas, el *atractor extraño* es aquel que conduce a dos puntos con condiciones de partida muy parecidos a lugares muy distantes dentro de un sistema. Geométricamente, un atractor extraño es un fractal.

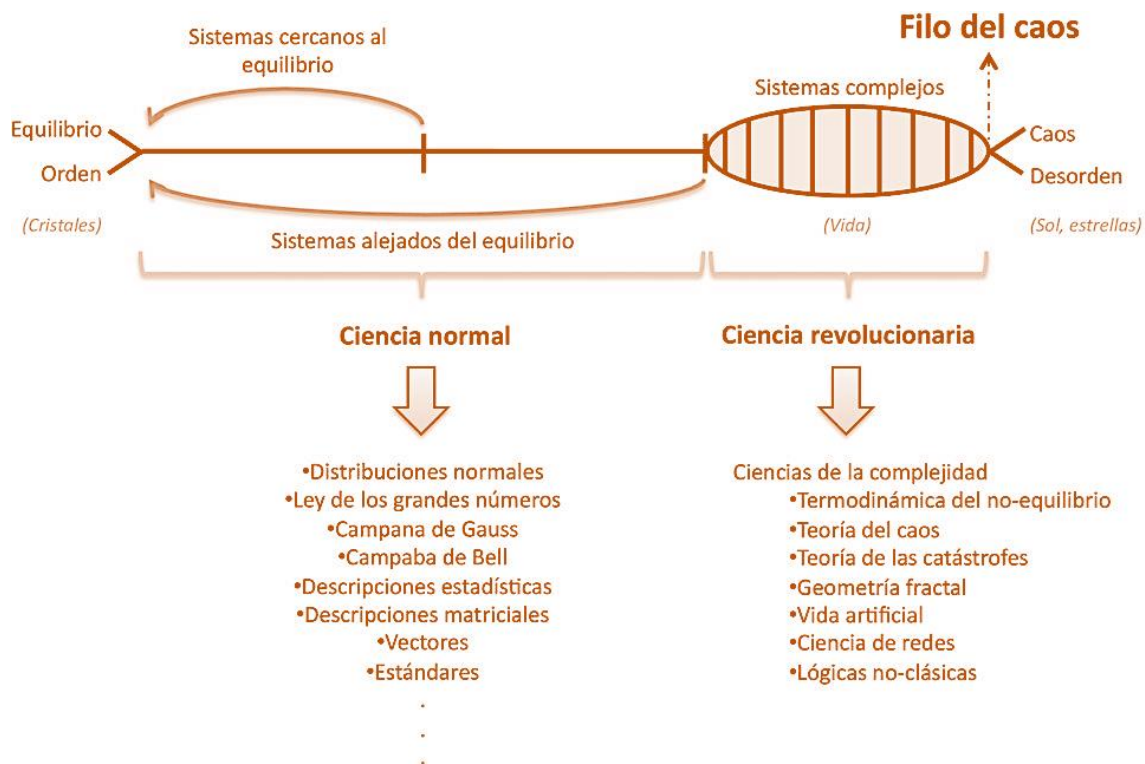


Fig. 138: El espacio de las Ciencias de la Complejidad en contraste con la ciencia normal
 Fuente: Maldonado & Cruz, *El mundo de las Ciencias de la Complejidad*, 2011, p. 10.

CAMINO HACIA LA CIENCIAS DE LA COMPLEJISAD

El siguiente desarrollo se basa en los estudios de Carlos Maldonado y Nelson Gómez Cruz (2011): en primera instancia, se toma en cuenta los antecedentes de las Ciencias de la Complejidad, para estos autores, su origen teórico se encuentra en el descubrimiento del cálculo infinitesimal por parte de Newton y Leibniz, sentando las bases para el estudio del movimiento aperiódico y no-cíclico. El cálculo infinitesimal –cálculo diferencial y cálculo integral– es propiamente el estudio de un tipo particular de movimiento que jamás había sido considerado con seriedad por Occidente: el movimiento aperiódico y no-cíclico. Habrá que esperar el descubrimiento del caos en el marco de la meteorología, mediante los estudios de Edward Lorenz (1917 – 2008) y la aplicación de la computadora, para considerar el movimiento impredecible, irregular, variable.

Posteriormente al descubrimiento del cálculo infinitesimal, respondiendo al desafío planteado por el rey Oscar II en 1887, a matemáticos y físicos, para que respondieran si el sistema solar es estable a largo plazo, Poincaré, según Gleick (1987) responde que es imposible demostrar que el sistema solar es estable, con la matemática y la tecnología de ese momento, ya que se debían considerar más de dos variables.

La genialidad de Poincaré reside en que la física newtoniana, vigente en ese momento, tomaba en consideración la relación entre no más de dos cuerpos, cosa que se evidencia en la ley de acción y reacción; al afirmar que es imposible predecir el comportamiento de un sistema con más de dos cuerpos, utilizando la ciencia vigente, se adelanta al concepto de interrelaciones entre multiplicidad de componentes de un sistema. Posteriormente, el tema será conocido como el problema de los n-cuerpos.

Turing y Gödel, según Maldonado y Gómez Cruz, constituyen otro antecedente de las Ciencias de la Complejidad. De Gödel y sus teoremas de incompletitud, ya se ha hablado al desarrollar las crisis de los modelos científicos del siglo XX; de Turing se puede sumar a lo dicho, que en 1936 publica *Los números computables, con una aplicación al Entscheidungs problema*, que hace referencia a un problema muy específico de la lógica simbólica permitiendo establecer si son verdaderas o falsas las proposiciones matemáticas.

Turing demuestra, con la ayuda de su máquina, que no existen algoritmos para determinados programas, por lo cual los problemas de computación se dividen en dos grupos: problemas decidibles y problemas indecidibles.

Turing encara, por primera vez en la historia, el tema de las computadoras, que posteriormente desarrollará John von Neumann (1903 – 1957).

LAS CINCO CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SEGÚN CARLOS MALDONADO

La Termodinámica del no equilibrio

Los trabajos de Ilya Prigogine (1917 – 2003) dan lugar al desarrollo de la termodinámica del no-equilibrio, primera de las Ciencias de la Complejidad, es decir,

(...) aquella que inaugura oficialmente con partida de nacimiento a las Ciencias de la Complejidad (...) El gran mérito de la termodinámica del no-equilibrio estriba exactamente en que introduce el tiempo como el factor mismo de la complejidad o de la complejización del mundo, de la sociedad, de la naturaleza. (Maldonado & Gómez Cruz, 2011, p. 16).

El equilibrio, en el marco de la termodinámica, implica la muerte pues el reposo conlleva la ausencia de interacciones, de relaciones, de dinámicas.

“En la materia en estado de equilibrio todo es lineal y existe una sola posibilidad o solución, en cambio en el estado de no-equilibrio las ecuaciones no son lineales y hay muchas propiedades posibles. Se trata de ecuaciones no lineales (...). En el equilibrio es posible linealizar todos los puntos que yacen sobre un mismo plano, en cambio en el no-equilibrio hay una no linealidad de los comportamientos de la materia. Siempre aparecen nuevos estados físicos de la materia, una riqueza de comportamientos y multiplicidad que no es posible hallar en el equilibrio porque debemos introducir el elemento de la historicidad, del tiempo”. (Prigogine, 2012).

De esta forma, Prigogine, no sólo introduce la variable tiempo en la conservación de la vida, sino que demuestra cómo en el universo sólo existen sistemas abiertos que dependen para su funcionamiento y estructura del medioambiente, de donde obtienen la energía, la cual es en parte conservada, en parte transformada y en muy buena parte incluso desechada de nuevo al medioambiente. Es decir, los equilibrios del universo no son absolutos inamovibles, sino dinámicos que posibilitan la vida misma.

La Teoría del Caos

Esta teoría es considerada como la tercera revolución de la física después de la teoría de la relatividad y de la mecánica cuántica. En 1903 el fisicomatemático Henri Poincaré (1854 – 1912) enunció, “el azar no es más que la medida de la ignorancia del hombre” (En Gleick, 1987), poniendo en tela de juicio las seguridades y omnipotencia de la ciencia racionalista. De este modo, Poincaré se refería a aquellos fenómenos que no responden a una dinámica lineal. Gleick también consideró esta frase de Poincaré como el embrión de lo que luego sería la *Teoría del Caos*, presentada en 1980, por David Ruelle, Edward Lorenz, Mitchell Feigenbaum, Steve Amale y James A. Yorke. “La teoría del caos es un campo de estudio relativamente nuevo que puede definirse como el estudio cualitativo de la conducta periódica e inestable en sistemas dinámicos deterministas y no-lineales”. (Kellert, 1993, p. 2).

Lorenz fue el primero en reconocer lo que se denomina “comportamiento caótico” en el modelado matemático de los sistemas meteorológicos, a principios de la década de 1960. La teoría del caos trata de sistemas dinámicos complejos, por lo que no presentan linealidad y acusan dependencia sensible de las condiciones iniciales; es decir, pequeñas variaciones en dichas condiciones iniciales pueden implicar grandes diferencias en el comportamiento futuro, imposibilitando la predicción a largo plazo.

Esta teoría, en su momento, supuso una revolución científica, al reflejar que muchos sistemas que se habían considerado deterministas y previsibles presentan severos límites en su previsibilidad. Es decir, la ciencia se enfrentaba a la impredecibilidad.

Es esta impredecibilidad la que mostrará el espacio deconstructivista; al mismo tiempo, el hecho urbanístico en sí, será considerado un sistema complejo dinámico, pero deberá esperar el avance de la informática para ser analizado y proyectado en consecuencia, debido a las interrelaciones de multiplicidad de variables a considerar.

Las ideas de Lorenz dieron lugar al comienzo a un nuevo campo de estudio que afectó, no sólo a las matemáticas, sino prácticamente a cada rama de la ciencias tanto biológicas, como físicas y sociales; todas ellas de incidencia en la arquitectura.



Fig. 139: Rem Koolhaas. Impredecibilidad

Fuente: <https://image.slidesharecdn.com/historiaexposicin-130605112219-phpapp02/85/deconstructivismo-70-320.jpg?cb=1370434693>

La Teoría del Caos, junto a la Teoría de la Relatividad y la Física Cuántica, han significado las grandes revoluciones del siglo XX para un nutrido conjunto de científicos.

Kerry Emanuel -profesor de ciencias atmosféricas en el MIT-, refiriéndose a Lorenz expresó que al demostrar que ciertos sistemas deterministas tienen límites formales en la previsibilidad, puso el último clavo en el ataúd del universo cartesiano, fomentado lo que algunos han llamado “la tercera revolución científica del siglo XX”, siguiendo los talones de la relatividad y la física cuántica.

Geometría Fractal

La herramienta utilizada por la Teoría del caos para el estudio de los sistemas dinámicos caóticos es la geometría fractal, creada por Mandelbrot en 1975, gracias al empleo de la computadora, apoyado por IBM, basándose en la representación de las ecuaciones de variable compleja desarrolladas por Julia en su tesis doctoral (1918).

La geometría fractal provee una descripción y modelo matemático para las complicadas formas de la naturaleza, tomando en cuenta tres características de las mismas:

1. Propone una dimensión fraccionaria a diferencia de las tres dimensiones enteras de la geometría euclidiana
2. Las formas naturales se reproducen repitiendo y conservando su estructura, lo que se denomina autosimilitud, pudiendo ser ésta estadística o matemática
3. Los fractales se obtienen por un algoritmo recursivo de iteración.

Dimensión fractal de Hausdorff

Si bien el espacio euclidiano tiene dimensión entera 3; la geometría fractal aporta una dimensión determinada por un número real, donde la dimensión euclídea es un caso particular de ella; en realidad, generaliza el concepto de dimensión euclidiana para objetos geométricos que no admiten espacio tangente.

La dimensión de un fractal es D si

$$N(h) = (1/h)^D$$

Por lo cual:

$$D = \frac{\log N(h)}{\log \frac{1}{h}}$$

Donde N(h) es la cantidad de círculos de radio fijo máximo h, necesarios para cubrir completamente un espacio X determinado. Por lo tanto N (h) es inversamente proporcional a h.

Cuando el valor h tiende a 0, podemos encontrar el número más pequeño de áreas cerradas de radio h necesario para cubrir al espacio X (Spinadel, 2003, p. 73).

La dimensión de una recta es 1, pero en la naturaleza no encontramos rectas. La rama de un árbol no es una recta pero tampoco un plano posee dimensión 2; la fractalidad nos brinda las dimensiones intermedias. Por ejemplo, si se toma la dimensión de la curva de Koch o copo de nieve, según sucesivas iteraciones tendremos:

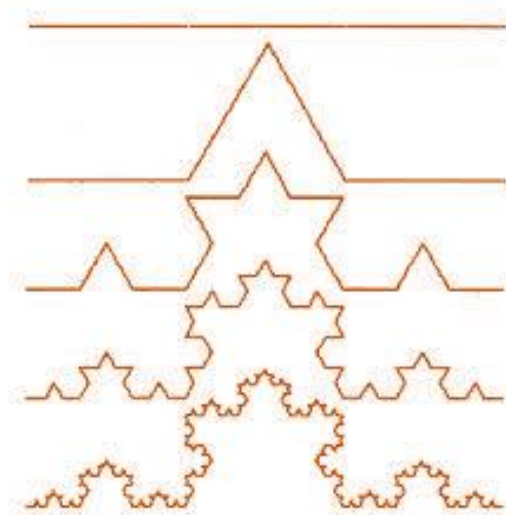


Fig. 140: La curva no es una recta, por lo tanto su dimensión no es uno, pero tampoco cubre el plano.

Fuente: <http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/article/viewFile/677/388>

El gráfico muestra las diversas iteraciones de una acción determinada partiendo de un segmento de recta cuya dimensión es 1, partiendo de dividir en tercios y aplicando un algoritmo obtenemos la dimensión:

$$D = \text{Log } 4 / \text{Log } 3 = 1,26185\dots$$

Iterando el algoritmo utilizado, siempre obtendremos la misma dimensión. Una curva que no es una recta pero tampoco un plano; su dimensión se ubica entre ambas

En 1980, con aportaciones de físicos y matemáticos como Ruelle, Lorenz, Smale y Yorke, queda establecida la Teoría del Caos, teoría matemática de sistemas dinámicos no lineales, describiendo bifurcaciones, extrañas atracciones y movimientos caóticos.

La arquitectura no va a ser ajena a esta teoría y en la figura se puede observar una aproximación formal del Simmons Hall con el fractal llamado, esponja de megel.



Fig. 141: Esponja de Menger

Fuente: <https://matemelga.wordpress.com/2015/01/09/la-esponja-de-menger/>
Residencia Simmons Hall

Fuente: https://es.wikiarquitectura.com/wp-content/uploads/2017/01/Simmons_hall_foto_02.jpg

Teoría de las Catástrofes.

Según Maldonado & Cruz, la Teoría de las Catástrofes es la cuarta de las Ciencias de la Complejidad.

René Thom y E. Zeeman presentaron, en 1970, la Teoría de las Catástrofes, que se basa en el estudio de las bifurcaciones de sistemas dinámicos, caracterizando y clasificando a los fenómenos por súbitos desplazamientos de su conducta.

Catástrofe es el término que se emplea en las matemáticas y adicionalmente, en las Ciencias de la Complejidad, para designar cambios súbitos, imprevistos e irreversibles. Por lo tanto, el término “catástrofe” no debe ser entendido necesariamente en un sentido negativo.

Puede considerarse un caso especial de la teoría de la singularidad usada en geometría; un ejemplo lo encontramos en la Teoría del Big Bang para la cual el universo se generó partiendo de un estado extremadamente denso y caliente, siendo ésta la singularidad.

La teoría de las catástrofes reviste especial importancia en el estudio de sistemas dinámicos, cuyo comportamiento no puede ser descrito por el cálculo diferencial. Tiene especial aplicación en el análisis del comportamiento competitivo y en los modelos de cambio organizativo y evolución social.

En realidad, “la teoría es un lenguaje, el lenguaje que permite construir una teoría general de modelos que tiene por finalidad expresar dinámicas, movimientos, procesos justamente súbitos, sorprendidos e irreversibles tanto en la naturaleza como en la sociedad en general.” (Maldonado & Gómez Cruz, 2011, p. 23).

Ya René Thom (1923 – 2002), al estudiar con herramientas topológicas la aparición, estabilidad y desaparición de formas a partir de ciertos invariantes que llama rupturas o singularidades, se adelantaba a la teoría de las catástrofes desde la morfología.

La Ciencia de las Redes

La ciencia de redes es la más reciente de las Ciencias de la Complejidad surgida entre los años 2001 y 2003, y desarrollada por S. Strogatz, d. Watts y L. Barabasi, de manera independiente.

Las redes complejas se basan en los conceptos matemáticos de la topología y la Teoría de Grafos. Siendo Watts sociólogo, Strogatz, matemático y Barabasi, físico, la ciencia de las redes se establece como una ciencia válida tanto para la sociología, como para la matemática y la física.

Esta es la ciencia de las estructuras dinámicas, cambiantes, variables, impredecibles y evolutivas; es decir, de todos los sistemas naturales y artificiales, cuya importancia radica en sus relaciones, interdependencias e interacciones que coexisten en ellos.

El concepto fundante de la teoría de las redes es la Teoría de Grafos; lingüísticamente la palabra “grafo” tiene origen griego y significa **imagen** o **dibujo**, y constituye un modo de esquematizar las relaciones entre componentes de una problemática determinada. Matemáticamente un grafo es una terna $G = (V; A; F)$, donde:

V es un conjunto de puntos llamados vértices; A es el conjunto de líneas que une a los vértices, llamadas aristas; F es una función que hace corresponder a cada elemento de “A”, un par de elementos de “V”.



Fig. 142: Puentes de Königsberg

Fuente:

<https://www.researchgate.net/publication/320638009> El uso de redes complejas en economía

El primer artículo que refiere a este tema fue escrito por Euler en 1736, dando solución al problema de los siete puentes de Königsberg en el cual se planteaba lo siguiente: ¿es posible dar un paseo comenzando desde cualquiera de las regiones que unen los puentes, pasando por todos los puentes, recorriendo sólo una vez cada uno y regresando al mismo punto de partida?

Euler observó que éste no era un problema geométrico en el sentido tradicional en que se alude a medidas y cuantificaciones, en este caso, no importaban los largos de los puentes ni el tamaño de las regiones a vincular, sino que respondía a lo que Leibniz había llamado “geometría de posición”, que daría lugar a la Topología.

Euler reemplazó cada región por un punto al que denominó vértice y unió a los puntos con líneas a las que llamó “aristas”, llegando a la conclusión que no se podían recorrer todas las áreas pasando una sola vez por un puente. Esto lo logra mediante la definición y caracterización de *Camino Euleriano*, mediante el cual no se pueden recorrer todos los vértices pasando una sola vez por ellos si el número de aristas que llegan a más de dos vértices es impar.

Con esta solución, Euler da comienzo a la Teoría de Grafos.

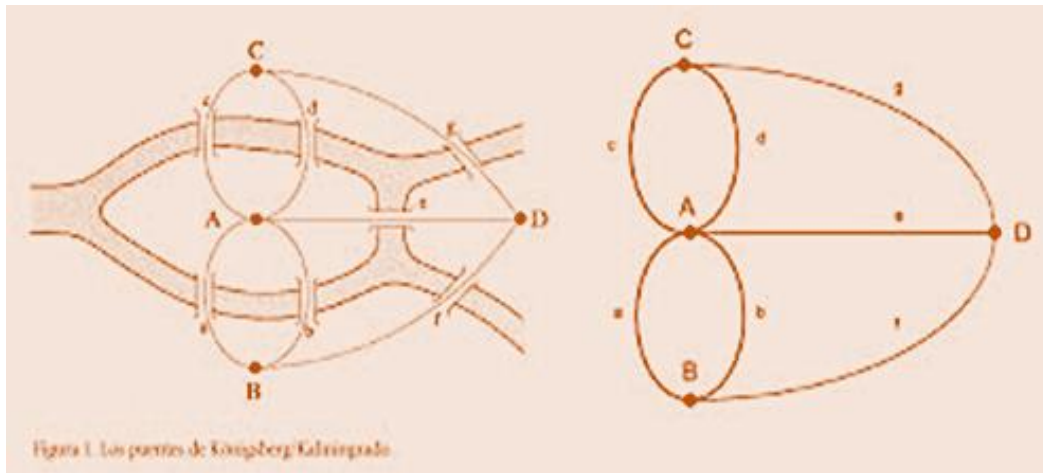
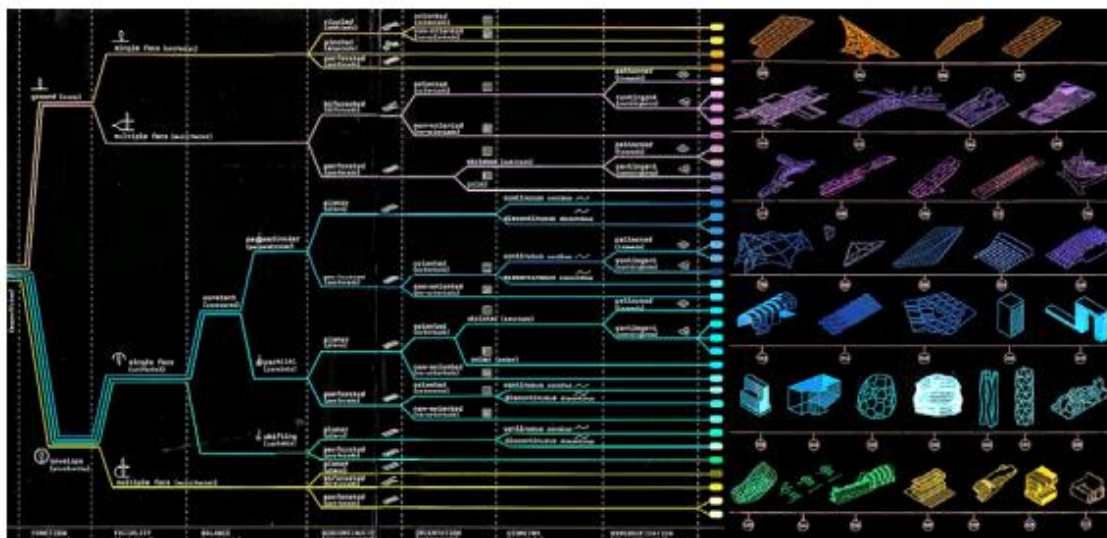


Figura 1. Los puentes de Königsberg/Kaliningrado

Fig. 143: Solución matemática de los puentes de Königsberg mediante grafos.

Fuente: <https://steemit.com/spanish/@carolina88/los-puentes-de-koenigsberg-nacimiento-de-la-teoria-de-grafos>

Los grafos y las redes derivadas de ellos, además de ser fundamentales para la informática y la topología, actualmente se utilizan en las más diversas disciplinas a efectos de esquematizar problemáticas analizadas desde la complejidad a efectos de conceptualizarlas; en arquitectura serán fundamentales en el desarrollo de la diagramática, incluyendo los diagramas filogenéticos, circulatorios y de instalaciones.



16. Prototipos diagramáticos que posibilitan conformar un lenguaje proyectivo. Filogénesis, FOA, Alejandro Zaera-Polo, 2001.

Fig. 144: Prototipos diagramáticos que posibilitan conformar un lenguaje proyectivo.

Filogénesis, FOA, Alejandro Zaera-Polo, 2001.

Fuente: <https://eduardonavarromartinez.wordpress.com/2015/03/02/la-arquitectura-como-elemento-comunicador-autonomo/>

Los conceptos desarrollados en esta sección de la tesis -correspondientes a pensamiento complejo y Ciencias de la Complejidad-, conforman un todo que se realimenta y acrecienta, llevándonos a caminos cada más más inciertos y con resultados inesperados.

La capacidad de interconectar distintas dimensiones de lo real, dejando de lado el absoluto y el encasillamiento del pensamiento tradicional fueron trazando el camino hacia las lógicas científicas “no – clásicas”. En términos de Maldonado, las lógicas no-clásicas surgen debido a una doble circunstancia: de un lado, debido a que las formalizaciones de la lógica clásica –en sentido estricto, la lógica simbólica o lógica matemática– eran muy rígidas; del otro, debido a que sus formalizaciones eran demasiado flojas. Como consecuencia, emergen sistemas alternativos de notación que posteriormente llegarán a ser conocidos como las lógicas no-clásicas y, en un sentido más positivo, como lógicas filosóficas.

III.4. CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA

Al comenzar el presente trabajo se ha definido a la *Arquitectura Compleja* en función de la red de interrelaciones generadas por sus variables constitutivas, mientras que al término *variable* se le adjudicó la condición de constructo abstracto.

La nueva visión del mundo, de la cual son referentes las nociones de pensamiento complejo y Ciencias de la Complejidad, ya expuestas, han dado lugar a una nueva forma de entender la arquitectura.

Se asume que el abordaje del hecho arquitectónico complejo, incluyendo el de su configuración espacial, se concreta teniendo en cuenta las interrelaciones de componentes vistas desde la mayor cantidad de perspectivas posibles, incluyendo al sujeto, la totalidad, lo impredecible y lo emergente. Esta concepción multidimensional inclusiva que considera al sujeto como un organismo más de su medio ambiente, ha devenido en un pasaje de una visión antropocéntrica a una visión biocéntrica; el ser humano ya no es el centro del universo ni lo domina.

Al día de hoy, es impensable trabajar en arquitectura sin la presencia de las más diversas áreas del conocimiento con las cuales se formulan algoritmos informáticos que posibilitan la manipulación y la interrelación de los datos que ingresarán al sistema como símbolos y podrán visualizarse y concretarse, tecnología mediante. Este tema se tratará al desarrollar estrategias de la arquitectura compleja.

A efectos de mantener la coherencia con el tema que se está desarrollando, a continuación se expresan distintas perspectivas de espacio, pertenecientes a varios autores.

Para Van de Ven, la nueva postura arquitectónica junto a las herramientas científicas a las que recurre, para la configuración y concreción espacial implica el rechazo a “la idea de un espacio reducido a geometría y perspectiva (la armonía platónica), a lugar (el topos aristotélico) o a estructura y proporción; pues éstas eran todas las referencias, de las que el espacio propiamente dicho era una consecuencia”. (Van de Ven, 1981, p. 123).

El espacio arquitectónico, para T. Ando (1995), sólo se concreta cuando es experimentado, percibido y recorrido por el ser humano, siendo que *la arquitectura sólo se considera completa con la intervención del ser humano que la experimenta*.

Al respecto, Fuentes Farías afirmó:

El espacio no solo está constituido por la concreción material sino por el conjunto de percepciones vivencias y concepciones del paradigma que se

genera, constituyendo materia, símbolos, significantes y vivencias en diálogo constante con el entorno del que se realimenta y devuelve energía en un estado continuo de entropía”²⁶ (Fuentes Farías, 2012, pp. 36 – 42).

Mientras que Cabas García analiza la idea del espacio, considerándolo *un concepto*: Sabemos que existe en una dimensión física, pero su entendimiento puede ser interpretado de distintas maneras, desde puntos de vista filosóficos hasta geométricos, pasando por conceptos fenomenológicos hasta meramente funcionales, y todo depende de la época histórica de su contexto. (Cabas García, 2014, pp. 74-85).

Este concepto de Cabas García nos lleva a repensar el principio de recursividad organizacional de Morin que rompe con la causalidad lineal; referido este concepto a la configuración espacial, se puede inferir la ruptura con la linealidad producto-productor, ya que todo lo que es producido incide en el productor. De ahí podremos entender el espacio desde el ser humano que lo habita y/o produce, y lo que ha producido el espacio en ese ser humano ya que estamos mirando al espacio complejo desde su carácter hologramático.

El espacio arquitectónico, como una totalidad que se autoorganiza, es existencial, y al poseer direccionalidad y sentido, es resultado y a la vez referencia de un compromiso ontológico (...). Por ello, el paradigma de la complejidad se cumple al observar la retroalimentación entre el mundo mental, social y espacio-temporal vistos como una totalidad de sentido (...) desde el cual el ser humano organiza su mundo (...). En tanto que toda construcción obedece a reglas, y que estas permiten a los usuarios organizar distintos ámbitos de su propia realidad, dicho espacio se autoorganiza y evoluciona como los sistemas vivos y el lenguaje, como los sistemas sociales, el conocimiento y el pensamiento mismo. (Fuentes Farías, 2012, pp. 36 – 42).

La crisis de identidad de la ciencia en el siglo XX, con el protagonismo de los principios físico - matemáticos de relatividad e incertidumbre, de la biología y las teorías de la

²⁶ Según la RAE, la entropía en física es la medida del desorden de un sistema. Como entropía se conoce la tendencia natural a la pérdida de orden en un sistema. En teorías de la información, la entropía es el grado de incertidumbre que se tiene en relación con un conjunto de datos. Mientras que, en Informática, hace referencia a la aleatoriedad recogida por un sistema operativo o una aplicación para su uso en criptografía.

complejidad a ellos asociados, juntamente con el estudio de los sistemas dinámicos caóticos, ha introducido una aleatoriedad inevitable en nuestra propia idea de orden: las múltiples trayectorias de todo proceso de desarrollo no lineal, no tenderán a resultados absolutos y únicos, sino que se formularán mediante procesos combinatorios de resultados y probabilidades de que éstos puedan producirse.

En la arquitectura, los principios de organización espacial conllevan el olvido de cánones y preceptos, así como de jerarquías y absolutos. Surgen nuevas posibilidades metodológicas y una conciencia crítica capaz de reflexionar y comprender la ambivalencia sobre el espacio, es decir, la complejidad intrínseca que se halla en el mismo corazón de la ciencia y de la arquitectura.

Se propone, al decir de Gausa:

(...) una mirada “transversal” sobre el propio escenario contemporáneo capaz de relacionar la definición y la organización del hábitat y del entorno (esencia última de la arquitectura) con la propia interpretación –científica, social, filosófica y artística- del espacio y el tiempo a él asociados. (Gausa, 1999, p. 6).

La actual comprensión del espacio y del tiempo, responden a procesos dinámicos de desarrollo no lineal; el “*espaciotiempo*” (de esta forma lo escribió Penrose) entendido como el modelo matemático que combina el espacio y el tiempo en un único continuo como dos conceptos inseparablemente relacionados, será protagonista en la configuración espacial compleja, al igual que la evolución y las fuerzas modeladoras de las formas.

Bajo este concepto, la concepción del espacio arquitectónico de tres dimensiones cartesianas se adentra en un espacio de cuatro dimensiones con interacciones entre espacio y tiempo, la informática ha permitido el acceso a otras dimensiones y otras concepciones del espacio derivando en una arquitectura multidimensional, lo que implica desechar la simple manipulación de formas y figuras para tomar en cuenta las relaciones entre múltiples dimensiones. Serán condicionantes del espacio, los modelos organizacionales que toman en cuenta para la configuración espacial arquitectónica, las fuerzas dinámicas que influyen en la forma.

Tradicionalmente, en arquitectura, el espacio abstracto del diseño es concebido como un espacio neutral ideal de coordenadas Cartesianas (...). En

otros campos del diseño, sin embargo, el espacio de diseño es concebido como un entorno de fuerzas y movimiento más que como un vacío neutral. (Lynn, 1999, p. 10).

Lynn aporta un claro ejemplo de la consideración de fuerzas dinámicas actuantes sobre la forma, hecho de repercusión en la configuración espacial.

En el diseño naval, la forma del casco de un bote es pensada para anticiparse al movimiento, no hay expectativas de que su forma cambie aunque debe absorber las fuerzas actuantes sobre el mismo, con el movimiento del agua.

Un nuevo espacio es modelado dejando de lado las estáticas tipologías formales, funcionales y la exclusividad de las fuerzas gravitacionales como sustento estructural; el espacio es modelado como un todo irreductible dando lugar a las propiedades emergentes, de ahí su impredecibilidad y la incertidumbre del diseñador.

De volúmenes definidos por coordenadas Cartesianas se pasa a superficies topológicas definidas por coordenadas vectoriales U y V . Otro subproducto estético obvio de estos modelos espaciales, es el predominio de las técnicas de transformación y deformación disponibles en los sistemas basados en el tiempo de superficies flexibles. Estas no son meras formas, sino la expresión de las matemáticas de un medio topológico (...). La apariencia orgánica de lo que más adelante será abordado como un sistema de interacción y curvilinealidad, es el resultado de principios organizadores basados en diferenciales. (Lynn, 1999, p. 18).



Fig. 145: Transformaciones topológicas de la materia mediante la topología

Fuente: <https://francis.naukas.com/2016/07/03/nuevas-fases-de-la-materia-gracias-a-la-topologia/>

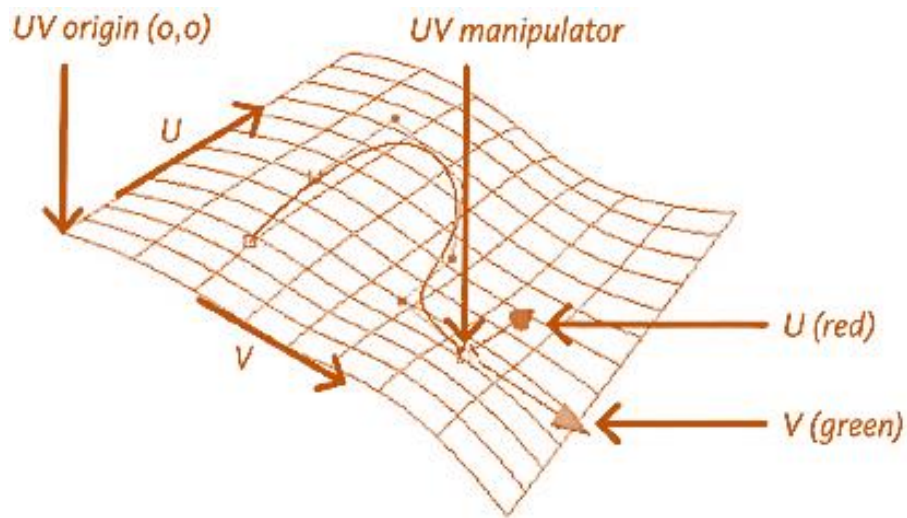


Fig. 146: Coordenadas uv en el espacio. Autodesk Maya 2010

Fuente: <https://www.oreilly.com/library/view/learning-autodesk-maya/9781897177556/sec003.htm>

Existen tres propiedades fundamentales de organización en un computador que son muy diferentes de las características de los medios utilizados tradicionalmente para expresar y representar un diseño, como lo son el lápiz y el papel; la informática permite manejar la topología, el tiempo y los parámetros. Las entidades topológicas serán protagonistas en la configuración espacial compleja dada las implicancias temporales y formales de estas, mientras que los parámetros abren un abanico de respuestas a cada interrogante.

III.5. GEOMETRÍAS EMPLEADAS EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA

Los modelos científicos de la complejidad fueron acompañados de modelos geométricos en un diálogo constante y fructífero.

Con el advenimiento de las Ciencias de la Complejidad, la geometría se aleja de formas idealmente perfectas de tres dimensiones enteras, inexistente en la naturaleza, echando mano de las geometrías no euclídeas y la topología; pero “tanto las geometrías euclidianas como las no-euclidianas son parte del mismo universo geométrico, en el que la geometría euclidiana es simplemente un caso especial, aunque es el que se ha establecido sólidamente en el pensamiento y la práctica de la arquitectura en los últimos siglos”. (Kolarevic, 2003, pp. 17, 49).

La geometría euclidiana no tiene en cuenta la idea esencial de la curvatura del espacio, por lo tanto la física newtoniana, que se sirve de ella, se dedicará al estudio de las fuerzas gravitacionales, dejando de lado esa variable.

Si bien la topología asume en la arquitectura compleja, un protagonismo primordial, en el ámbito operativo, cuando a una estructura topológica se le da una forma geométrica y arquitectónica, se la coloca en el campo euclidiano.

Considerando algunos ejemplos correspondientes a distintos sistemas geométricos, se puede aludir a la geometría de Riemann, llamada “geometría esférica”, en la cual el plano está situado en la superficie de una esfera, y la línea es una circunferencia que tiene el mismo radio que la esfera, por lo tanto, la distancia entre dos puntos es siempre una distancia curva, no una distancia plana; en la geometría de Poincaré, las líneas son hipérbolas en un plano cartesiano; por último se podría acotar que en un punto cualquiera, hay un número infinito de líneas que son paralelas a otra línea, a diferencia del quinto postulado de Euclides, por el cual, por un punto exterior a una recta para una única paralela a ella.

Estas geometrías aportan una conceptualización distinta del espacio, algunos *software* de modelización permiten transformaciones en el modelado del espacio cartesiano, pudiéndose acercar a las características espaciales de algunas de las geometrías no-euclidianas.

En esencia, la geometría subyacente en las Ciencias de la Complejidad es una geometría viva y abierta, como había intuido D'Arcy Thompson y cambiante como investigó Robert Le Ricolais.

A partir de los años sesenta, ante el cambio que van enfrentando las ciencias, aumenta el número de variables consideradas al enfrentar una problemática determinada, por lo tanto una geometría de tres dimensiones, estática y basada en ejes coordenados cartesianos, es insuficiente para brindar un modelo matemático de la naturaleza y la realidad circundante, por añadidura, al hacerse presente la dependencia sensible en los sistemas naturales, los estudios geométricos deberán enfrentar la impredecibilidad; por lo que será necesario desarrollar una matemática de base algorítmica con multiplicidad de variables interactuantes entre sí.

La geometría compleja no atiende a una forma concreta, sino que representa el comportamiento de la forma en sus cambios de estados, por lo que es de suma importancia la parametrización de dichos cambios y el manejo de algoritmos, siendo los atractores complejos los encargados de representar los cambios a lo largo del tiempo.

La falta de una única y absoluta definición geométrica de la forma, afectará a la forma misma. En definitiva, más que hablar de geometría, sería más apropiado hablar de la genética de la forma.

Manuel Gausa et. al. en el *Diccionario Metápolis de Arquitectura Avanzada* define este concepto:

El supuesto de una sistematización elástica -topológica- de la forma, en ciertos procesos de generación abierta, anuncia lo que se denomina una nueva genética de la forma basada en la programación de sistemas dinámicos fluctuantes en campos de fuerza dinámicos a su vez, destinados a evolucionar -simulado, orientado, inducido y materializado- a partir de procesos espaciales desarrollados en el tiempo. (Gausa et. al., 2016, p. 250).

A finales de los años noventa, con la aparición de los métodos digitales de representación y visualización de la arquitectura, se adoptaron nuevos lenguajes y nuevos procesos de creación, aunque todavía no podemos hablar de arquitectura compleja pues no se tenía en cuenta el carácter holístico de la misma; sólo cuando se incorpore a la arquitectura este carácter, los nuevos procedimientos tecnológicos, darán lugar a geometrías en las que con

la intervención de diversas variables, incidirán en una configuración espacial dejando definitivamente de lado las relaciones, que en un pasado, se habían establecido entre la geometría y la arquitectura.

Son las herramientas informáticas la que permitirán a las geometrías y matemáticas en general, avanzar de forma superlativa.

Las ramas de la matemática, que serán protagonistas de la configuración espacial compleja, permitiendo su gestación y concreción, son la geometría diferencial, la topología, que evolucionará en la topología algebraica y la geometría algebraica.

La geometría algebraica se encarga de relacionar la geometría analítica y el álgebra abstracta, mientras que la geometría diferencial surge al utilizar los métodos de cálculo diferencial e integral en el estudio de las figuras geométricas, estudiando curvas y superficies en el espacio euclidiano tridimensional.

Cuando coexisten más de una variable, aparecen las consideraciones geométricas que son importantes para entender determinados fenómenos; el tema consiste en considerar todas las soluciones posibles de los sistemas de ecuaciones y no, una única solución.

En retroalimentación constante, informática y matemática crecieron ampliando sus campos de aplicación y su interrelación con las formas, abriendo nuevos horizontes en la arquitectura.

El diseño asistido por computadora está relacionado con la representación, manipulación y diseño de objetos matemáticos, perteneciente a los campos del análisis matemático, la geometría algebraica, el análisis numérico y la geometría diferencial éstos serán utilizados masivamente por los diseñadores, muchos de ellos, sin entender el concepto que manejaban.

GEOMETRÍA DIFERENCIAL

Ante un público no especializado en geometría, y mediante muy pocas fórmulas matemáticas, Bernhard Riemann (1826 – 1866) presentó en 1854 en la universidad de Gotinga su trabajo *Los fundamentos de la geometría*, recibiendo el apoyo de Karl Friedrich Gauss (1777 – 1855) quien llevaba mucho tiempo interesando en los

fundamentos de la geometría y discrepaba radicalmente de quienes pretendían “demostrar” que la geometría euclídea era la única geometría posible.

En la presentación realizada en esa universidad, introducía el concepto de *variedad matemática*, definida como un conjunto de puntos, determinado cada uno de ellos por varias coordenadas. Hasta ese momento, la geometría había trabajado con el espacio tridimensional euclídeo; Riemann se planteaba la posibilidad de trabajar con “espacios de coordenadas” sin ubicarlos en el espacio euclídeo ni en ningún otro espacio.

En 1861, presentó a la “Academia de París” un desarrollo detallando los cálculos en los que fundaba su exposición de 1854.

Las ideas de Riemann pronto empezaron a ser desarrolladas por otros matemáticos, pero tildaban de muy abstractos los razonamientos de la geometría diferencial, hasta que en 1954, Jean-Louis Koszul (1921 – 2018) introduce el operador (gradiente), que no es otra cosa que una generalización del concepto de derivada parcial, que permite extender el cálculo diferencial en R^n con coordenadas cartesianas al cálculo con coordenadas curvilíneas.

La geometría diferencial moderna no sólo proporciona el aparato algebraico necesario para presentar con rigor el concepto de variedad abstracta esbozado por Riemann y demostrar sus resultados y sus conjeturas, sino que constituye además el marco más adecuado para el cálculo vectorial y el álgebra geométrica que diversos matemáticos habían desarrollado a lo largo del siglo XIX, y pronto se convirtió también en una herramienta indispensable en otras ramas más abstractas de la matemática, como la topología algebraica o la geometría algebraica. (Castillo, 2019, p. XI).

Ramas de la geometría diferencial

Geometría diferencial de curvas: Permite estudiar las curvas simples en variedades de la geometría de Riemann, fundamentalmente en el espacio euclídeo.

Geometría diferencial de superficies: expone las técnicas y definiciones para estudiar la geometría de variedades diferenciales o de superficies de dos dimensiones introducidas en variedades de Riemann, principalmente en el espacio euclídeo.

Geometría diferencial de variedades: una variedad es un elemento geométrico modelo en matemática. Se hallan diferentes variantes según el dominio específico tomando en cuenta:

Las Variedades diferenciables;

La Variedades algebraicas;

Las Variedades aritmética.

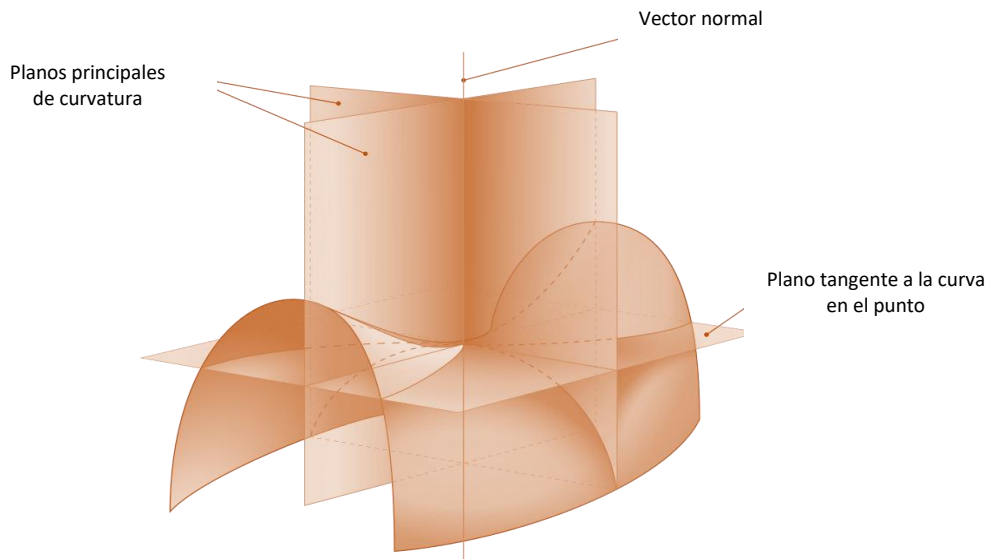


Fig. 147: Curvaturas principales de un punto de una superficie

Fuente: https://www.wikiwand.com/es/Geometría_diferencial_de_superficies

Las necesidades de la geometría diferencial en función de los progresos de la topología, obligaron a establecer rigurosidad en las definiciones básicas de los espacios multidimensionales.

Antes de avanzar con este tema, se introducirán algunas definiciones a efectos de facilitar los desarrollos posteriores, de amplia aplicación en la generación de la configuración espacial de la arquitectura compleja.

TOPOLOGÍA

La última de las ramas de la geometría clásica en aparecer la constituye la topología, que refiere al estudio geométrico de los cuerpos, sin tener en cuenta las medidas; esta rama, gracias a la geometría diferencial, resultó fundamental para el desarrollo de las nuevas morfologías y los programas de diseño asistido por computadoras.

Según Euler (1707- 1783), Leibniz (1646 – 1716) fue el primero en ocuparse de ella a la que llamó *Geometría de la posición*. En una de sus cartas a Huygens, en 1679, Leibniz le expresaba: “Necesitamos otro análisis estrictamente geométrico que pueda expresar claramente el *situm* de la misma manera que el álgebra expresa el latín *magnitudem*”. (Kantor, 2005).

Es decir, esta geometría de la posición debía ocuparse de la posición de los cuerpos y de las propiedades provenientes de esa posición sin tener en cuenta las cantidades, ni su cálculo.

Por lo tanto, la topología se dedica al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que al ser sometidos a deformaciones permanecen inalterables verificando la capacidad elástica de su geometría para retener propiedades generales, las cuales sólo se pierden por rompimiento o desgarramiento.

Formalmente, es la rama de la matemática que estudia los *espacios topológicos* y las funciones continuas, interesándose por conceptos como compacidad, proximidad, textura, etc.

Llamamos espacio topológico a todo conjunto E en el cual se distinguen una familia de subconjuntos, llamados abiertos que cumplen los siguientes axiomas:

- La unión de cualquier número de abiertos es un abierto
- La intersección de dos abiertos es un abierto
- El conjunto vacío es un abierto
- El conjunto total E es un abierto.

Los elementos de un espacio topológico se llaman puntos. (Noriega & Santaló, 2020, p. 8).

Conceptualmente, un espacio topológico es una estructura matemática que permite la identificación formal de conceptos como convergencia, conectividad y continuidad.

Dos objetos son equivalentes, en el ámbito de la geometría euclidiana, mientras que la transformación de uno en otro se lleva a cabo mediante isometrías, es decir, mediante

transformaciones que conservan las medidas de ángulos y longitudes; simetrías y traslaciones.

En los objetos topológicamente equivalentes, se pasa de uno al otro mediante una transformación continua y reversible. Existe una correspondencia “biunívoca” entre los puntos de la figura original y los de la transformada; entendiéndose por correspondencia biunívoca, la que a cada elemento de una clase, le hace corresponder uno y solo uno de la otra, siendo éste el transformado de la primera.

Las ramas de la topología son:

Topología general: constituye la base de la disciplina, se ocupa del estudio de los espacios topológicos y los entornos de un punto.

Topología algebraica: implementa herramientas para el estudio de funciones biyectivas y continuas, con inversas continuas en espacios topológicos, cuando las herramientas de la topología general son insuficientes. Está basada en la teoría de conjuntos y la teoría de números.

Topología diferencial: considera las variedades diferenciables y las funciones diferenciables entre ellas.

Temas abordados por la topología:

Teoría de grafos, la cual resultará fundamental para el desarrollo de la diagramática arquitectónica

La teoría de nudos

La teoría de las superficies por la cual se clasifican todas las superficies compactas y no compactas, de gran incidencia en la arquitectura.

La topología cobra mayor valor durante el siglo XX cuando los matemáticos cambian su foco de estudio al encarar problemas de gran escala en vez de considerar problemas de pequeña escala, lo que Michael Atiyah (1929 – 2019) denominó *de lo local a lo global* (Atiyah, 2002, p. 36).

El estudio del comportamiento de los problemas de gran escala, es decir “lo global”, en gran parte es cualitativo, por lo que resultó de suma importancia la topología. Poincaré dio los primeros pasos en la topología, prediciendo el protagonismo que adquiriría a futuro.

En la *Geometría Diferencial clásica* se describen porciones pequeñas del espacio con ecuaciones que modelan la geometría partiendo de lo local. En cambio, cuando “queremos entender el cuadro global de superficies y la topología que conllevan; (...) al movernos de lo pequeño a lo grande, las características topológicas resultan ser las más significativas”. (Atiyah, 2002, p. 36).

APORTES DE LA GEOMETRÍA DIFERENCIAL A LA TOPOLOGÍA

Generalización del concepto de dimensión

El concepto de “dimensión” tiene un significado matemático muy amplio y, por lo tanto, encontraremos variadas definiciones. Entre ellas, existe siempre la noción de recubrimiento del espacio, de lo que me referiré más adelante.

La dimensión es un número relacionado con las propiedades métricas o topológicas de un objeto matemático, existiendo diversas concepciones de ella según la rama de la matemática que se aborde. Por ejemplo, la dimensión de un espacio vectorial está dada por su base canónica que permite considerar espacios n-dimensionales, la dimensión fractal está definida por un número real - la que ya se ha desarrollado al hablar de Ciencias de la Complejidad - y la dimensión topológica.

En el espacio euclídeo el punto es 0-dimensional, la línea es 1-dimensional y el plano es 2-dimensional.

Dimensión del espacio vectorial

La dimensión de un espacio vectorial está dada por la cantidad de vectores linealmente independientes que forman su base canónica.

Los sistemas de diseño asistido por computadoras se basan en espacios vectoriales.

La base canónica del espacio vectorial tridimensional está dada por el siguiente sistema de versores²⁷.

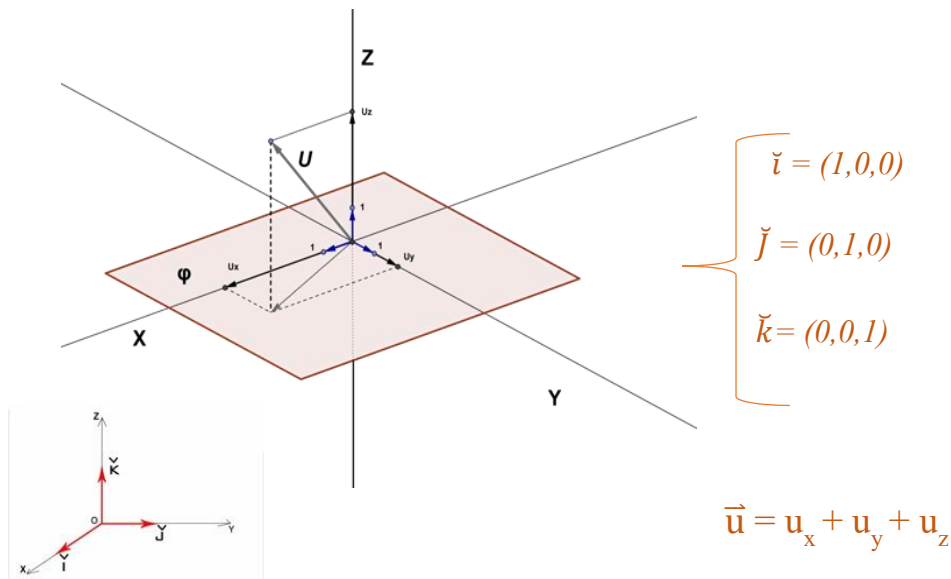


Fig. 148: Ubicación de puntos en el espacio mediante vectores asociados al origen de coordenadas cartesianas. vectores en el espacio.
Fuente: Elaboración propia

Dimensión topológica

La dimensión topológica expresa del objeto de medida conectividad de los puntos.

Estableciendo que el punto tiene dimensión topológica cero, se dice que una figura es unidimensional, si su frontera está compuesta de puntos; bidimensional, si su frontera está compuesta de curvas, y tridimensional, si su frontera está compuesta de superficies.

Topológicamente, una circunferencia y un segmento rectilíneo son la misma curva y encierran el mismo tipo de superficie, pues es posible transformar una en la otra mediante una deformación continua, pero no ocurre lo mismo desde el punto de vista métrico. Aparece aquí el concepto de invariantes, es decir, las propiedades que se conservan y qué ocurre con las que no lo hacen. En el ejemplo del segmento y la circunferencia, lo que se conserva es la dimensión topológica.

²⁷ Los versores son vectores unitarios perpendiculares entre sí

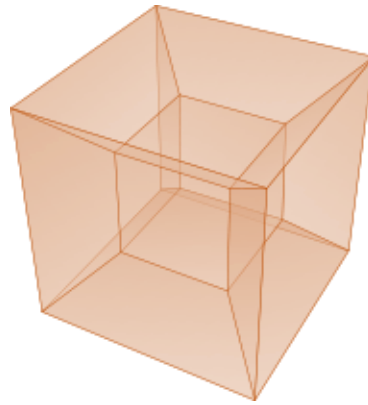
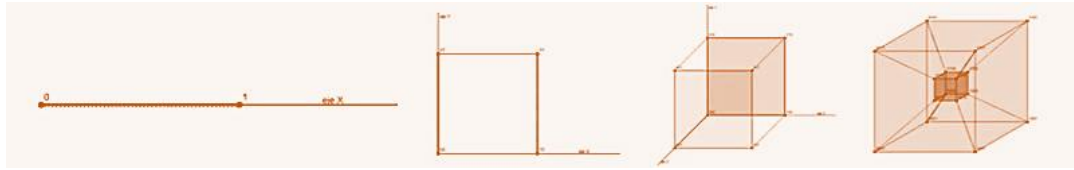


Fig. 149: Esquema que muestra las cuatro primeras dimensiones

Fuente: <https://patogiacomino.com/2014/05/31/bienvenidos-a-la-cuarta-dimension-que-es-el-4d/>

En forma sencilla, se podría enunciar las distintas dimensiones expuestas de la siguiente manera:

Dimensión de inmersión: refiere al espacio que contiene al objeto de estudio. Cuando expresamos \mathbb{R}^3 decimos que nos encontramos en un espacio de 3 dimensiones.

Dimensión topológica: su valor es siempre entero e informa si el objeto es una recta, un plano, un volumen, un hipervolumen, etc.

Dimensión fractal: puede ser entera o fraccionaria y refiere a cómo el objeto geométrico ocupa el espacio o el plano.

Habiendo definido dimensión podemos adentrarnos en la definición de variedades matemáticas

Variedades diferenciables matemáticas

Una buena parte de los conceptos y resultados del análisis matemático en \mathbb{R}^n se puede extender a espacios más generales, que denominaremos variedades diferenciables.

Intuitivamente, una variedad diferenciable M , es un espacio que localmente es equivalente a \mathbb{R}^n . Sintéticamente, una variedad es un objeto geométrico que generaliza la

noción intuitiva de *curva* y de *superficie* a cualquier dimensión y sobre *cuerpos*²⁸ diversos tanto reales como complejos o matriciales.

Una variedad n -dimensional M es un conjunto dotado de una colección P de funciones inyectivas de D en M , donde D es un conjunto abierto de un espacio euclídeo de n dimensiones, $E(n)$ tal que:

M está cubierta por las imágenes de las funciones de P ;

Para dos funciones cualesquiera de la colección P , las funciones inversas son euclídiamente diferenciables y están definidas en conjuntos abiertos de $E(n)$.

Dimensión y topología de las variedades

La primera noción relacionada con la variedad es su dimensión, designando ésta el número de parámetros independientes que es necesario fijar para situar *localmente* a un punto sobre la variedad.

Las curvas son variedades de dimensión uno.

En una superficie, son necesarias dos coordenadas.

Las variedades de dimensión superior a dos son representables gráficamente utilizando métodos determinados, por ejemplo, los diagramas de Heegaard o diagramas Freedman-Kirby.

Todas las variedades con una misma dimensión n (también denominada n -variedades) tienen la misma topología local; un pequeño entorno de una curva es análogo a una recta y un pequeño fragmento de una superficie es análogo a un plano.

Existen también, *variedades abstractas*, como la Botella de Klein que puede ser descriptas por un sistema de mapas y coordenadas representado por la red de meridianos y paralelos que aparecen en la figura.

²⁸ En álgebra abstracta, un cuerpo es una estructura algebraica conformada por un conjunto K no vacío y dos operaciones algebraicas llamadas adición y multiplicación, cumpliendo las propiedades: asociativa, conmutativa y distributiva, además de la existencia de un inverso aditivo y de un inverso multiplicativo, los cuales permiten efectuar las operaciones inversas de resta o sustracción y división (excepto la división por cero).

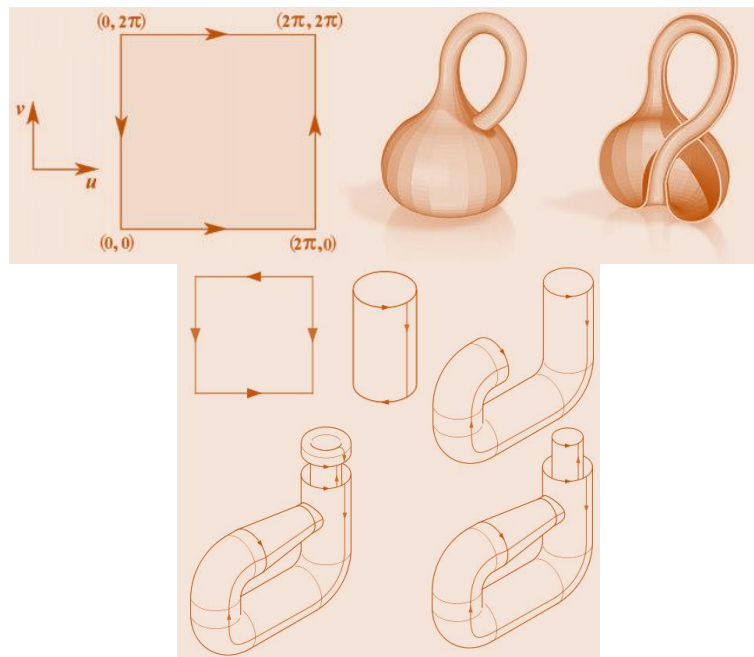


Figura 150: La botella de Klein. Definición intuitiva partiendo de un cuadrado (1882) y generada por el movimiento de una lemniscata en un círculo introducida en 1976 por T. Banchoff (cuya primera representación gráfica es de 1982 en un trabajo de S. Feiner, D. Salesin, and T. Banchoff).

Fuente: <https://francis.naukas.com/2012/12/26/la-botella-de-klein/>

GEOMETRÍA ALGEBRAICA

La geometría algebraica, como ya se dijo, se encarga de relacionar álgebra con geometría, siendo fundamental para su desarrollo, la informática. Estudia los sistemas de ecuaciones polinómicas con coeficientes en un cuerpo (Iborra Castillo, 2020, p. VII), entendiéndose por *cuerpo* a un sistema algebraico en las que se definen dos leyes: una de composición interna; y otra de composición externa (éstas pueden ser suma y multiplicación) verificándose las propiedades asociativa, conmutativa y distributiva, contando con la existencia de inverso y neutro en ambas leyes definidas.

Lagrange (1736 – 1813) ha sostenido que al unirse la geometría y el álgebra, se intercambiaron las fuerzas de estas disciplinas, avanzando juntas hacia la perfección.

La *geometría algebraica clásica* se ocupa de problemas posibles de plantear en términos de figuras determinadas por ecuaciones polinómicas.

Recordemos que una “función polinómica” f es una función cuya expresión es un “polinomio” tal como:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$$

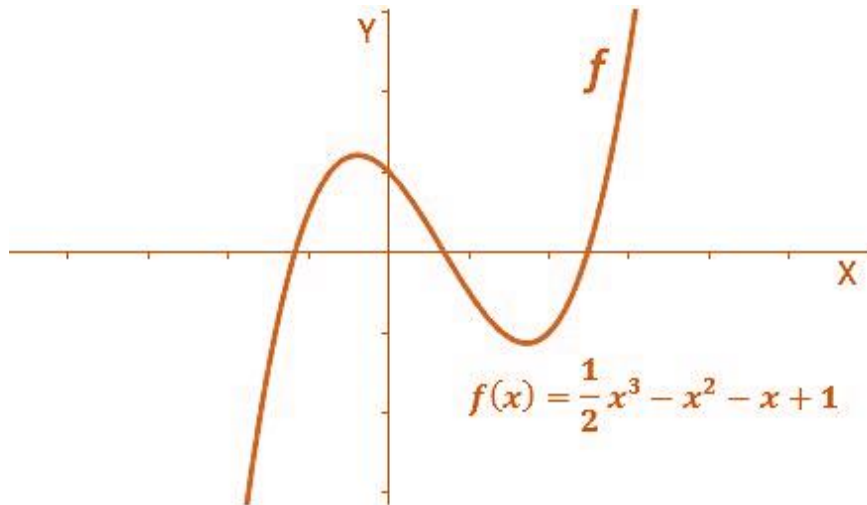


Fig.151: Gráfica de una función polinómica de tercer grado.

En las gráficas obtenidas con ecuaciones de segundo grado, entre ellas, las cónicas y las cuádricas, aparecen nuevos fenómenos. Si por ejemplo, se considera la figura que responde a la ecuación $x^2 + y^2 - z^2 = 0$ que corresponde a un cono con base en una circunferencia y vértice en el origen de coordenadas, no todos sus puntos gozan de las mismas propiedades intrínsecas, ya que las coordenadas del vértice son, $x = y = z = 0$, o sea un punto. Estamos en presencia de lo que en matemática se denomina “una singularidad”.

La aparición de los puntos singulares es uno de los conceptos que motivó la introducción de métodos específicos y es, quizá, una de las principales causas por la que la Geometría Algebraica llega a constituirse en especialidad. Según Athiya (2002), podemos pensar que la Geometría Algebraica no es otra cosa que el estudio de las singularidades.

La Geometría Algebraica moderna se ha mostrado indispensable en la resolución de cuestiones muy profundas y difíciles, como la tan esperada demostración del famoso problema planteado hace más de 300 años: el Teorema de Fermat, por Andrew Wiles, el cual afirma que la expresión : “ $x^n + y^n = z^n$ no tiene soluciones en números enteros para n mayor que dos” (Singh, 1999, p. 68).

Los conjuntos determinados por las soluciones de sistemas de ecuaciones polinómicas en varias variables con coeficientes sobre un cuerpo, en geometría algebraica, se denominan variedades algebraicas.

El estudio de los sistemas de ecuaciones lineales pasó de ser una mera manipulación de fórmulas a convertirse en el estudio de una serie de estructuras algebraicas abstractas, como espacios vectoriales, variedades afines, anillos de matrices, etc., y las aplicaciones que las conectan. (Ivorra Castillo, 2017, p. VII).

Estas estructuras permiten comprender el comportamiento de los sistemas de ecuaciones lineales conectándolos con la geometría; mientras que entender propiedades geométricas implica estudiar las variedades en "familias", esto es, estudiar las diversidades variando los coeficientes (parámetros) de los polinomios de las ecuaciones que las definen.

Por otra parte, el nivel de generalidad de la geometría algebraica, “permite aplicar sus técnicas y resultados y, en particular, el razonamiento geométrico, a muchos contextos en los que en principio no hay ninguna interpretación geométrica subyacente”. (Ivorra Castillo, 2017, p. VII).

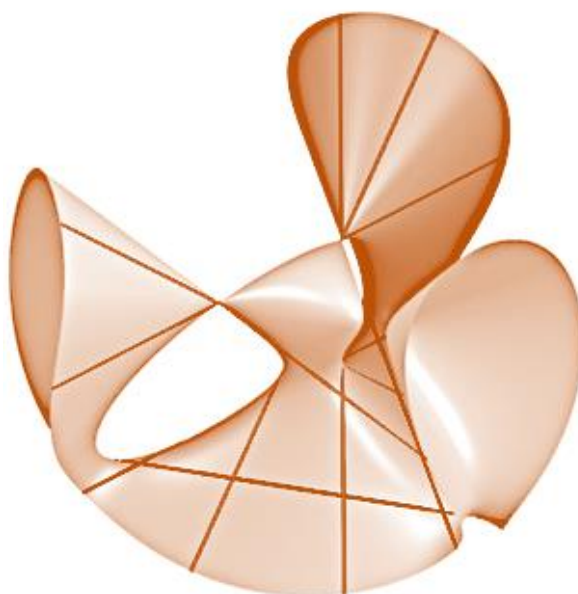


Fig. 152: Superficie cúbica con singularidades. Se muestran ocho líneas en la superficie cúbica. (Imagen cortesía de Dr. Oliver Labs y Prof. Duco van Straten, Cubics.AlgebraicSurface.net)

III.6. APORTES DE LA GEOMETRÍA DIFERENCIAL Y ALGEBRAICA EN LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA

Erróneamente, muchas veces se le atribuye el título de “arquitectura compleja” a aquellas obras que simplemente resultan de la utilización caprichosa del ordenador, dado que sus programas admiten la representación de formas no euclídeas en búsquedas formales o icónicas.

Sin embargo, debemos tener presente que en las obras complejas, tal como las hemos definido, las formas surgen del estudio, análisis y optimización de las variables interactuantes en el espacio y con el entorno.

Con la aparición de la computadora, se acentúa el estudio de curvas y superficies tratando de emular las formas de la naturaleza; los desarrollos que surgen de estos estudios se basan, en gran medida, en la fractalidad y en la geometría diferencial.

Los resultados obtenidos serán fundamentales en la generación de nuevas morfologías que responderán a las necesidades de la obra misma mediante la utilización de geometrías no euclídeas, permitiendo su concreción las nuevas tecnologías.

Antes del desarrollo del estudio de las curvas y superficies, manipuladas informáticamente y utilizadas en el diseño de obras complejas, se definirán algunos conceptos básicos de geometría diferencial, necesarios para comprender intuitivamente la fundamentación geométrica de esas curvas y superficies.

CONCEPTOS MATEMÁTICOS PRELIMINARES

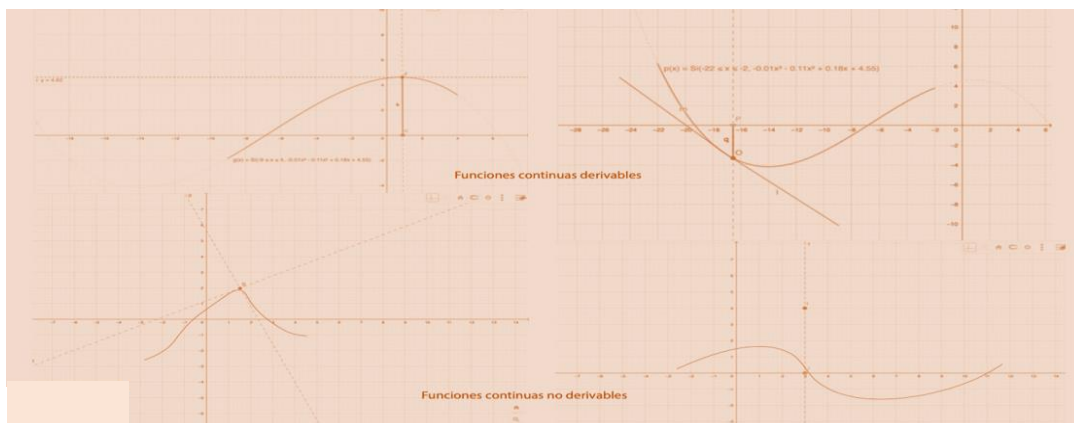
Función diferenciable

Sea $f(x)$ una función definida al menos en un entorno del punto $x_0 \in R$, diremos que $f(x)$ es derivable en el punto x_0 si existe y es finito el límite:

Este límite se denomina derivada de la función f en el punto x_0 y representa geoméricamente la pendiente de la recta tangente a la curva $y = f(x)$ en el punto de coordenadas (x_0, y_0) , de tal manera que la ecuación de dicha recta resulta ser:

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

Una función derivable es continua, pero no toda función continua es derivable pues puede no existir el límite mencionado anteriormente o ser distintos los límites a izquierda o derecha del punto; es decir, las pendientes de sus tangentes no son iguales. Este concepto será fundamental en el estudio de curvas y superficies.



En base a estas definiciones, es posible abordar la definición de *función diferenciable* que refiere a funciones de más de dos variables.

La función $z = f(x, y)$ es diferenciable en el punto p de coordenadas (x_0, y_0) si existen unos números A y B tales que:

$$z = f(x_0, y_0) + A(x - x_0) + B(y - y_0) \text{ es el plano tangente a la gráfica de } f \text{ en } (x_0, y_0).$$

Para que la función f sea diferenciable en (x_0, y_0) es necesario que existan las derivadas parciales de la función respecto de x y de y en ese punto.

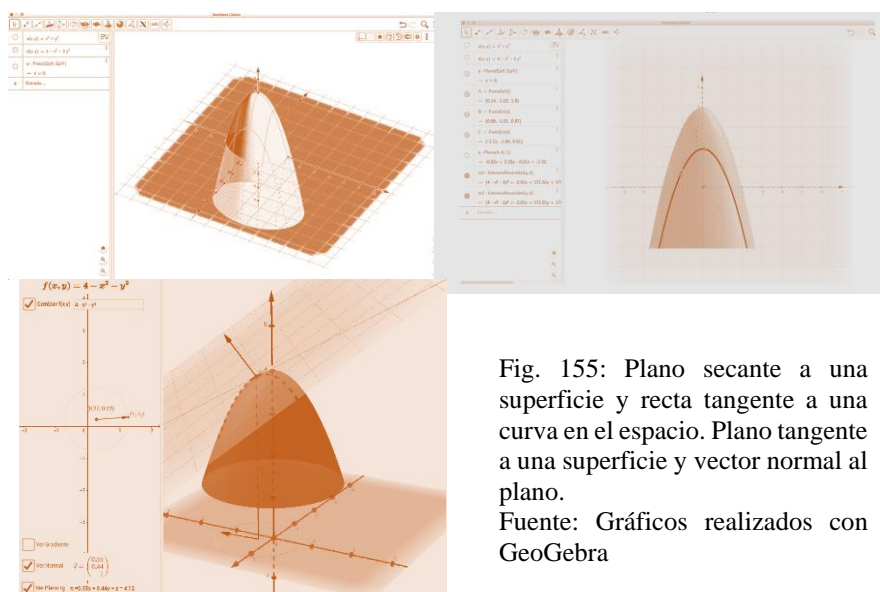


Fig. 155: Plano secante a una superficie y recta tangente a una curva en el espacio. Plano tangente a una superficie y vector normal al plano.
Fuente: Gráficos realizados con GeoGebra

Concepto matemático de parametrización

Una relación o una función matemática puede expresarse en forma explícita, puede estar representada por una ecuación o adquirir la forma paramétrica, donde cada variable se expresa en función de un parámetro determinado.

Forma explícita de una función:

En el plano $y = f(x)$: la variable y depende del valor de la variable x

En el espacio $z = f(x, y)$: la variable z depende de las coordenadas de x e y

Ecuación de dos o tres variables:

En el plano $f(x, y) = 0$

En el espacio $f(x, y, z) = 0$

Forma paramétrica:

Segmento de curva en 2 dimensiones: $(x(t), y(t)), t \in [a, b]$

Segmento de curva 3 dimensiones $(x(t), y(t), z(t)), t \in [a, b]$

Superficie paramétrica $(x(u, v), y(u, v), z(u, v)); (u, v) \in [a, b]$

Es decir, las componentes de los elementos del dominio y codominio ya sea en dos o tres dimensiones, son funciones dependientes de un parámetro t , siendo t un número real.

Un sistema de ecuaciones paramétricas permite representar una curva o superficie en el plano o en el espacio, dando una única respuesta para obtener cada punto de la curva o superficie, lo que factibiliza el empleo de las fórmulas en las computadoras pues admiten únicamente una orden que se ajuste a una sola respuesta, de lo contrario marcará error.

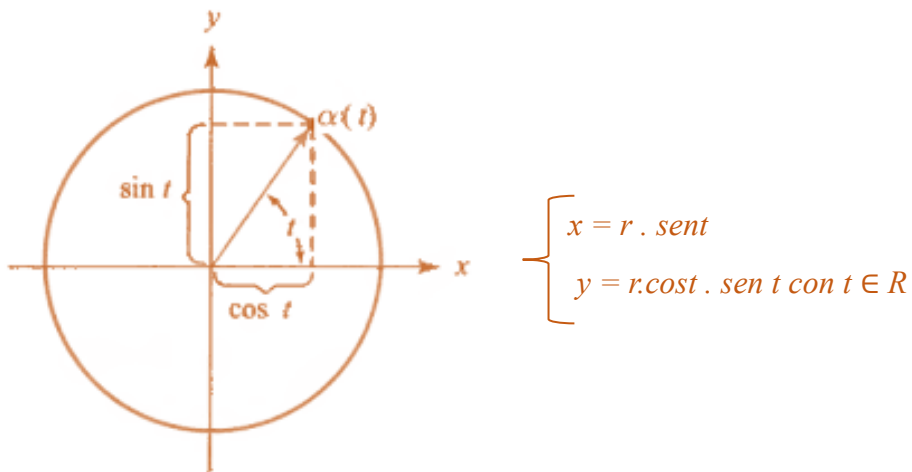
Ejemplo:

Una circunferencia con centro en el origen de coordenadas y radio r verifica que :

$$x^2 + y^2 = r^2$$

Si consideramos su expresión cartesianas estamos en presencia de una ecuación, no de una función, porque para un único valor de x encontramos dos valores de y . Esto no lo puede resolver la computadora.

Si consideramos, en cambio, su expresión paramétrica definiendo tanto la variable x , como la variable y , con funciones trigonométricas en función de un parámetro t , tendremos una única respuesta para cada orden impartida en la computadora.



Ecuación Paramétrica de la circunferencia

Curva diferenciable

Intuitivamente decimos que una curva es una línea continua de una dimensión, que varía de dirección paulatinamente. Tanto las curvas abiertas como la catenaria, la parábola y la hipérbola, como las cerradas, entre ellas la elipse y la circunferencia tienen dimensión topológica 1. Pero el concepto de curva diferenciable depende del concepto de función diferenciable.

Matemáticamente, diremos que una curva diferenciable parametrizada es la gráfica de una función con dominio en un intervalo real, ya sea abierto o cerrado, e imagen en R^3 , es decir el espacio; esta función le hace corresponder a cada elemento del dominio un punto del codominio, cuyas componentes son funciones diferenciables.

Una curva diferenciable parametrizada α , es una curva tal que $\alpha : I \rightarrow R^3$ siendo

$$I = (a, b) \text{ o } [a, b] \text{ en } R$$

que envía cada valor de $t \in I$ a un punto del espacio.

$$\alpha(t) = (x(t), y(t), z(t)) \in R^3$$

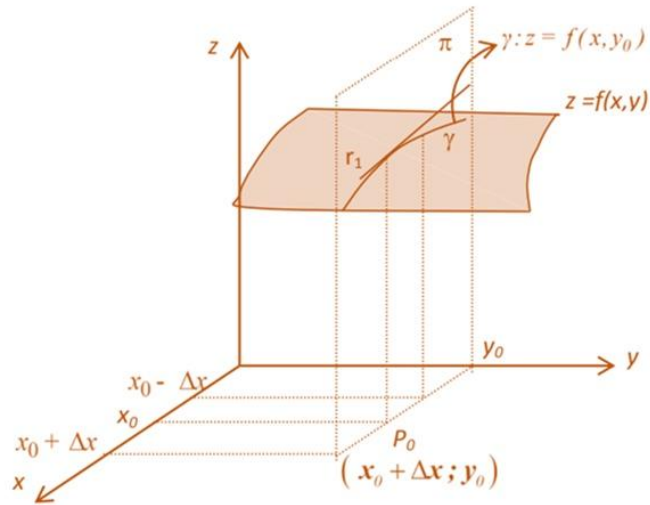
tal que las funciones

$$x(t), y(t), z(t) \text{ son diferenciables.}$$

Si denotamos con $x'(t), y'(t), z'(t)$ a las primeras derivadas de x, y, z en el punto t , el vector

$$(x'(t), y'(t), z'(t)) = \alpha'(t) \in R^3 \text{ es el vector tangente de la curva } \alpha \text{ en } t.$$

Diremos que α es una curva plana si existe un plano afín $P \subset \mathbb{R}^3$ tal que $\alpha(I) \subseteq P$.



La recta tangente a α en t es la recta de \mathbb{R}^3 que pasa por $\alpha(t)$ en la dirección de $\alpha'(t)$, esto es: $\{\alpha(t) + \lambda \alpha'(t) / \lambda \in \mathbb{R}\}$

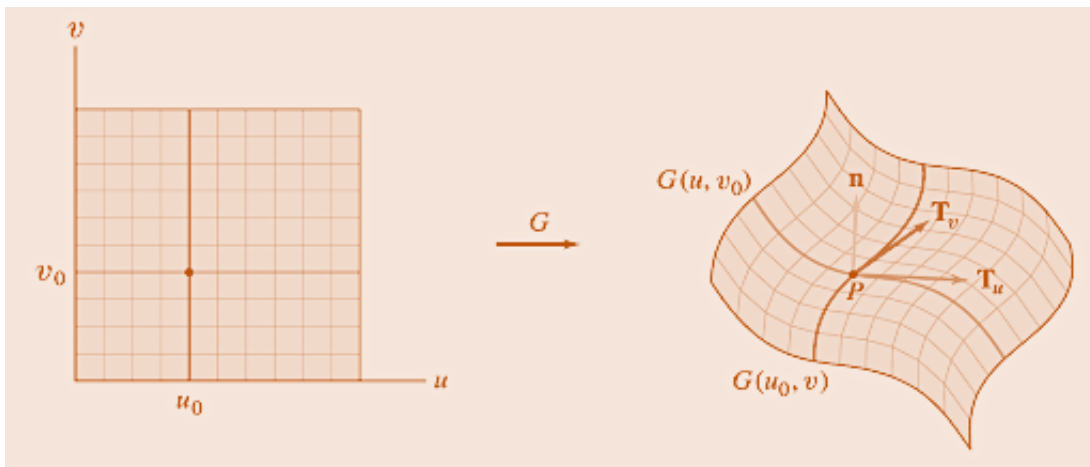


Fig. 156: T_v Vector tangente a la curva
 Fuente: <http://pbx-brasil.com/calculo03/Notas/Area02/dia02/curcor.html>

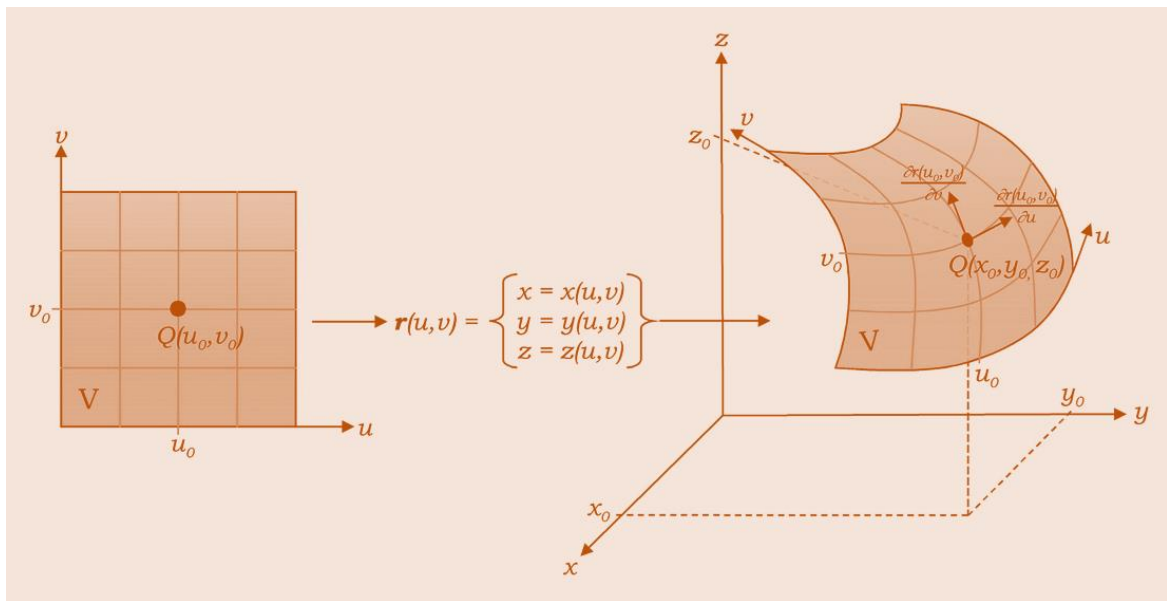


Fig. 157: Trazas, curvas en el espacio incluidas en un plano de \mathbb{R}^3

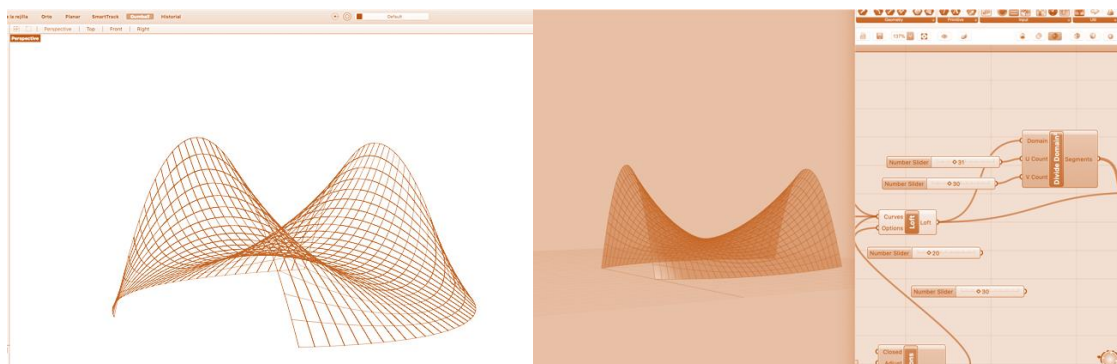


Fig. 158: Parametrización de una curva diferenciable en el espacio.
Fuente: Producción de Investigación Cátedra Toscano. Manuel Shibuya

INTERPRETACIÓN GEOMÉTRICA DE CURVAS Y SUPERFICIES UTILIZADAS EN EL DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)

Todos los programas de dibujo vectorial, entre ellos el CAD, el sketchup o el Grasshopper, permiten el trabajo con varios tipos de curvas de aproximación e *interpolación*.

Matemáticamente, la interpolación consiste en hallar un dato dentro de un intervalo en el que conocemos los valores en los extremos, permitiendo la geometría diferencial utilizar

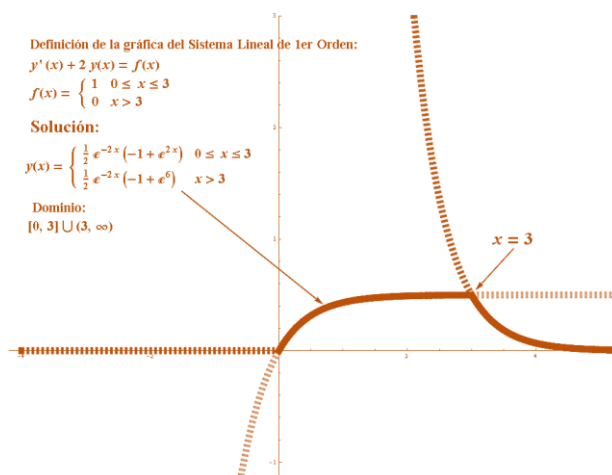
entornos infinitesimales. Las curvas de interpolación y aproximación a funciones diferenciales paramétricas definidas por partes²⁹.

En el CAD se utilizan líneas que interpolan su forma entre puntos. Los programas permiten interpolar la geometría de la curva con respecto a ecuaciones.

Algunas de las curvas utilizadas en el CAD son las splines, las Bézier, las B-Splines; las NURBS son curvas y superficies generadas por las curvas mencionadas anteriormente.

La procedencia histórica del empleo de estas curvas en el diseño se remonta a la antigua construcción de barcos para lo cual para determinar las curvas, se utilizaban listones de madera flexible al cual le colgaban pesas para deformarlas; esta herramienta se llamaba “spline” que es de donde deriva el actual nombre de las curvas utilizada en informática. Los romanos utilizaron plantillas de madera a gran escala, o moldes, para generar las nervaduras de madera variables que reforzaban los cascos de sus barcos. La curvatura de cada costilla se transforma a lo largo de la quilla

²⁹ En matemáticas, una función definida por partes es una función cuya expresión cambia dependiendo del valor de la variable independiente. Gráfico y notación de una función por partes. Fuente: <https://ecuaciondiferencial ejerciciosresueltos.wordpress.com/2012/10/26/como-resolver-una-dividida-en-partes-con-pvi/>.



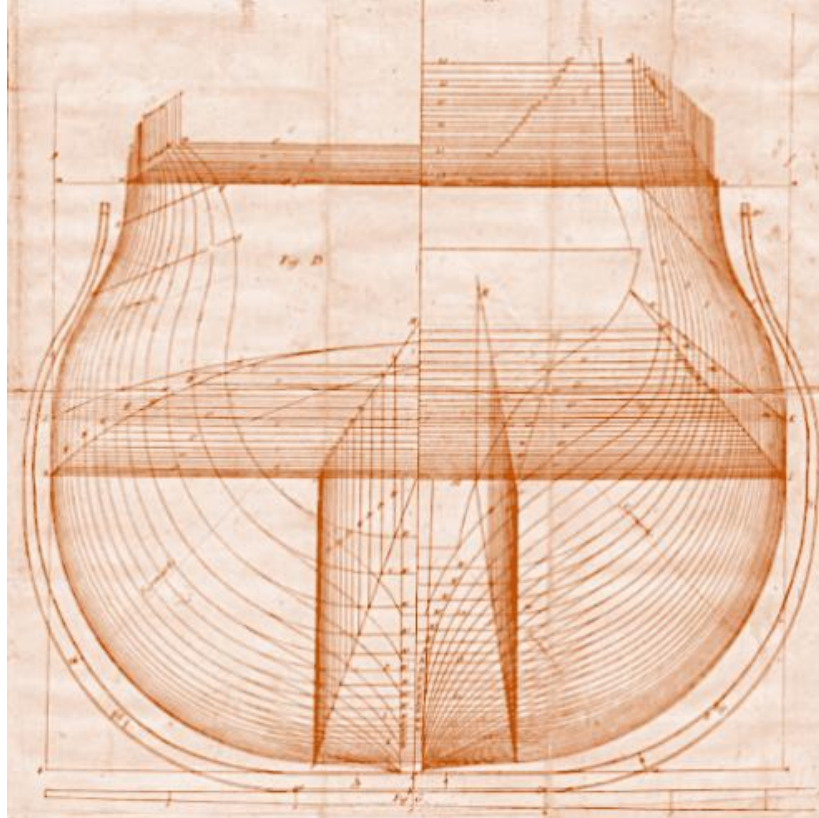


Fig. 159: Curvatura de las sucesivas costillas de la quilla.
Fuente: <http://www.alatown.com/spline/>

El perfil curvo de cada nervadura se trazó a partir de una plantilla maestra reconfigurable, que consta de piezas de madera rectas y arqueadas a trozos, hoy se podría decir que estas formas respondían a las gráficas de funciones por partes. Las marcas graduadas en la plantilla indicaban dónde se iban a reposicionar las piezas para cada nervadura sucesiva. Usando este primer método paramétrico, se podría fabricar una flota de barcos idénticos a partir de una sola plantilla. Las spline todavía se utilizan al día de hoy en la construcción naval.

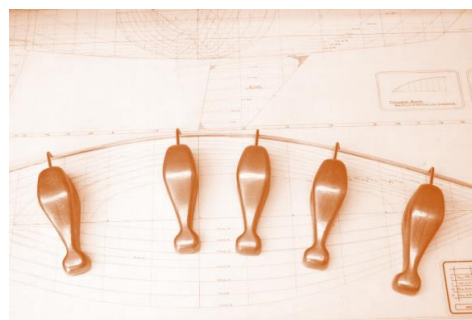


Fig. 160: Curva Spline determinada por pesos para construcción de las costillas del barco
Fuente: Edson International.

Más adelante, en la historia, con origen en el renacimiento, en dibujo técnico para realizar curvas suaves se utilizaban las plantillas Burmester o pistoletes.



Fig. 161: Plantillas Burmester y pistolette flexible

Fuente: <https://casasanchez.mitiendanube.com/productos/plantec-pistoletes-flexibles-plastico-biselado-con-alma-de-aluminio-largo-40cm-graduacion-milimetrica/>

Como ya se mencionó, actualmente en el diseño asistido por computadoras, es muy usual el empleo de curvas Splines, curvas de Bézier y B-Splines.

Los matemáticos franceses, Bézier y Casteljaou desarrollaron aplicaciones para el incipiente diseño computacional de los años sesenta, para ser utilizadas por las industrias Citroën y Renault respectivamente.

El problema que se le presentaba a la industria automotriz consistía en la necesidad de trazar curvas muy precisas, para lograr distintas piezas que permitiesen ensamblarse correctamente obteniendo, además, un diseño más atractivo, a efectos de cautivar una mayor cantidad de compradores.

Para obtener ese resultado, se debieron realizar desarrollos matemáticos, basados en geometría algebraica y diferencial, que permitiesen el trazado de lo que hoy, en forma genérica denominamos splines.

Bézier y Casteljaou se dedicaron esencialmente a los mismos problemas, llegando al mismo tipo de curvas, aunque con recursos matemáticos distintos.

Ambos métodos actualmente tienen su equivalente computacional, en las Curvas de Bézier y las *Splines*, elementos matemáticos que resultaron fundantes del diseño vectorial, basado en geometría algebraica y diferencial.

TRAZADORES INTERPOLANTES CÚBICOS

Geoméricamente,

(...) se conoce como Trazadores Interpolantes Cúbicos a un conjunto de segmentos de curva polinómica de tercer grado que unen una serie de puntos en el espacio entre sí – comúnmente llamados nodos–; y que además, pueden ser utilizados para interpolar puntos desconocidos en el interior de dicha serie de puntos. Existen diversas maneras de construir trazadores interpolantes cúbicos, cada una con sus peculiaridades matemáticas y geométricas. (Navas, 2010, p. 172).

Estas curvas continuas, definidas por funciones diferenciables por partes, conllevan una curvatura continua y cambiante muy adecuada para dar respuesta a las necesidades de las variables intervinientes en el diseño, ya sean constructivas, estructurales o perceptuales.

CURVAS SPLINE Y B – SPLINE

Si bien en forma genérica los diseñadores utilizamos el término *Spline* para denominar a ambas curvas, y algunos textos también lo hacen, éstas no son las mismas.

Ambas se constituyen mediante segmentos de curvas polinómicas cúbicas, según Navas la diferencia radica en lo siguiente:

Las curvas Spline interpolan todos los puntos de control o nodos y las B-spline no.

Todos los segmentos de las curvas Spline dependen simultáneamente de todos los puntos de control, mientras que los segmentos de las B-spline dependen sólo de los puntos de control más cercanos.

Las B-spline, se calculan mucho más rápido que las Spline, debido a la alta complejidad del algoritmo para cálculo. (Navas, 2010, p. 172).

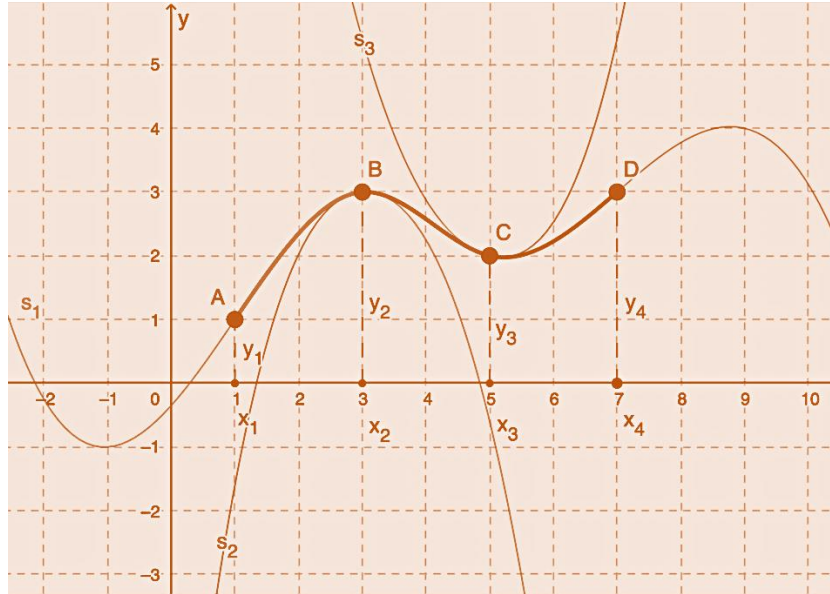


Fig. 162: Los nudos simples establecen una spline de tres polinomios cúbicos continuos. Los nudos triples en ambos extremos del intervalo aseguran que la curva interpola los puntos finales.
 Fuentes: Producción de Investigación Cátedra Toscano. Manuel Shibuya

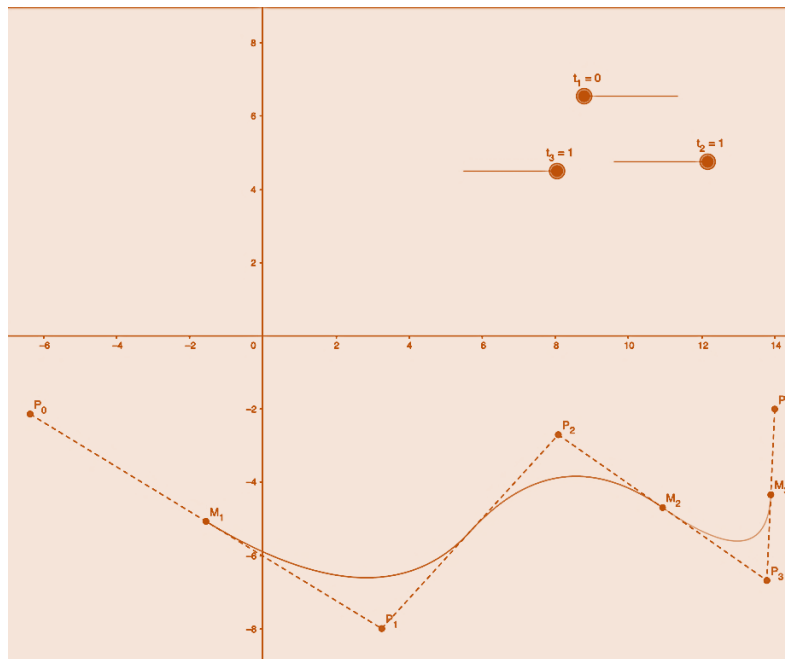


Fig. 163: Curva B-spline en dos dimensiones con polígono de control y vector de nudo.
 Fuente: Producción de Investigación Cátedra Toscano. Manuel Shibuya

Spline: Como ya se expresó, un spline es una curva que responde a una función diferenciable, definida por partes mediante funciones polinómicas de tercer grado que se genera a partir de un conjunto de puntos.

En el ajuste de curvas, los spline son utilizadas para aproximar formas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los spline los hacen populares para la

representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por computadora.

Sintéticamente, una curva spline es una representación matemática para la cual es fácil construir una interfaz que permitirá al usuario diseñar y controlar la forma de curvas y superficies complejas.

B-Spline: B-Spline es una función básica que contiene un conjunto de puntos de control. Las curvas B-Spline están definidas por la función base de Bernstein que tiene una flexibilidad limitada.

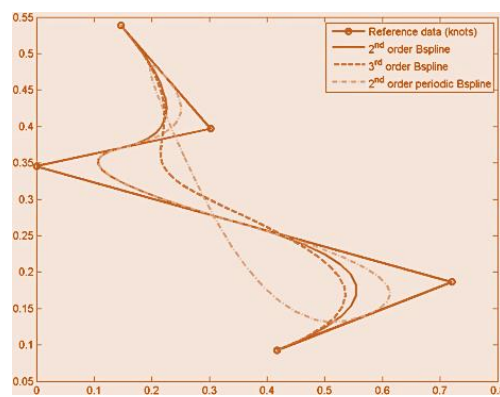


Fig. 164: Aproximación por B-Spline con puntos y polinomio de control. Fuente: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71456-b-spline-approximation>

CURVAS BEZIER

Estas curvas se especifican con condiciones de contorno.

Una sección de curva Bézier puede llenarse con cualquier número de puntos de control. El número de puntos de control a aproximar y su posición relativa determinan el grado del polinomio de Bézier.

En regla general, se puede describir una curva de grado n con sólo $n + 1$ puntos de control, que determinarán el polígono de control.

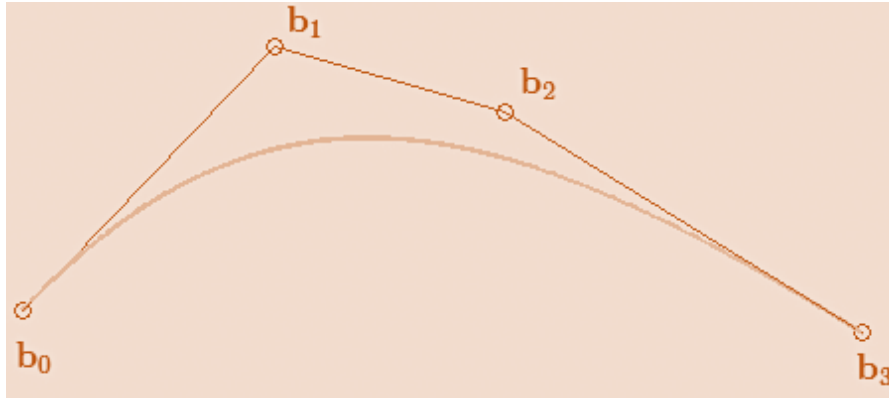


Figura165-A Cúbica de Bézier con su polígono de control.
 Fuente: https://www.wikiwand.com/es/Curva_de_B%C3%A9zier

Unos años antes que Pierre Bézier (1910 – 1999), Paul de Casteljaou (1930) trabajó esencialmente la misma idea, pero desde una perspectiva numérica. El ahora conocido como “algoritmo de Casteljaou” que es un método de aproximación numérica de los llamados polinomios de Bernstein, con los que se construye la ecuación de las curvas de Bézier.

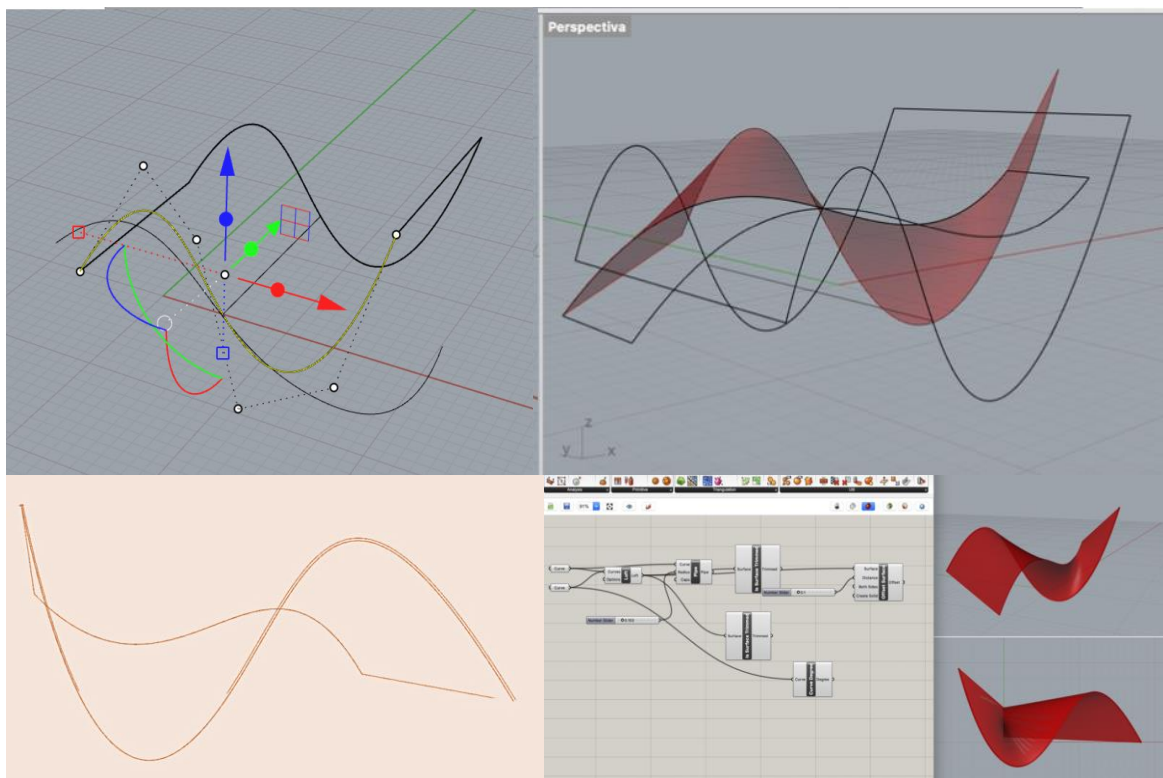


Figura165-B: Curvas Bézier y Spline, trazadas con grasshopper, generadoras de superficies con su polígono de control.
 Fuente: Producción Cátedra Toscano. Manuel Shibuy

CURVAS Y SUPERFICIES NURBS “LINEA DE BASE RACIONAL UNIFORME”

La spline racional no uniforme (NURBS) es un modelo matemático comúnmente utilizado para generar gráficos de curvas y superficies por computadora.

Ofrece una gran flexibilidad y precisión para manejar superficies definidas por fórmulas matemáticas y modeladas.

Además de ser utilizadas en el diseño asistido por computadora (CAD), las NURBS se utilizan comúnmente en fabricación asistida por computadora (CAM) e ingeniería asistida por computadora (CAE) formando parte de numerosos estándares de la industria.

Las herramientas NURBS también se encuentran en varios paquetes de software de animación y modelado en 3D como el Rhinoceros.

A pesar de ser de la misma familia, la principal diferencia entre las curvas y superficies NURBS con las curvas B – *spline* y curvas de Bézier, consiste en la ponderación de los puntos de control.

Mientras que las curvas de Bézier se desarrollan en una sola dirección paramétrica, las superficies NURBS evolucionan en dos direcciones paramétricas, generalmente llamada “s” y “t” o “u” y “v”.

Además de ser invariantes en las transformaciones afines, se pueden evaluar con algoritmos de gran precisión.

Las superficies NURBS son funciones de dos parámetros que se asignan a una superficie en un espacio tridimensional. La forma de la superficie está determinada por puntos de control.

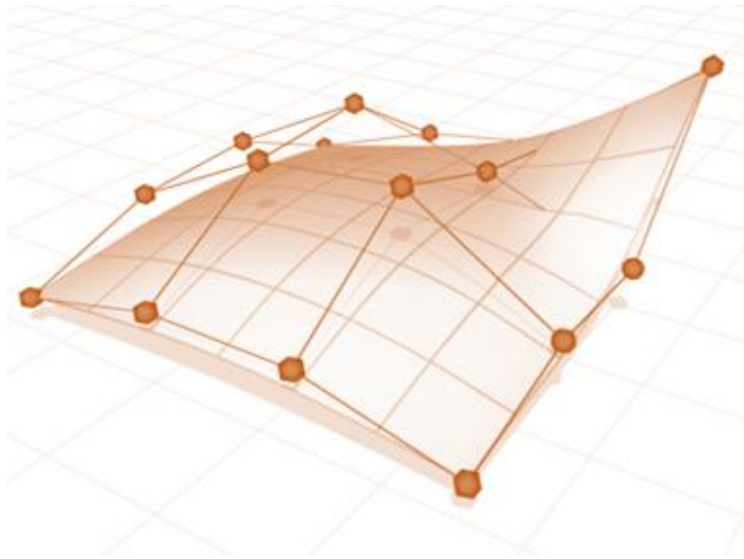


Fig. 166: Superficie NURBS con sus puntos de control.

Fuente: <https://rhino4all.wordpress.com/cad-ii-2013a/actividad-06-rhino-es-nurbs-grupo-a/>

En general, editar curvas y superficies NURBS es muy intuitivo y predecible. Los puntos de control siempre están conectados directamente a la curva y/o superficie. Dependiendo del tipo de interfaz de usuario, la edición se puede realizar a través de los puntos de control de un elemento, que son más obvios y comunes para las curvas de Bézier u otras herramientas como el modelado de *splines* o la edición jerárquica.

En la página del *Software Rhinoceros* (<https://www.rhino3d.com/es/features/nurbs/>) explica que una curva NURBS se define mediante cuatro elementos: grados, puntos de control, nodos y regla de cálculo; éstos no son otra cosa que los conceptos matemáticos que las definen.

Los puntos de control tienen un número asociado denominado peso. Con algunas excepciones, los pesos son números positivos. Cuando todos los puntos de control de una curva tienen el mismo peso, normalmente 1, la curva se denomina no racional. De lo contrario, la curva se denomina racional.

En el término NURBS, la R significa racional e indica que una curva NURBS tiene la posibilidad de ser racional. En la práctica, la mayoría de las curvas NURBS son no racionales. Algunas curvas, como los arcos, los círculos y las elipses, siempre son racionales. Rhino proporciona herramientas para examinar y modificar los pesos de los puntos de control.

Los nodos son una lista de números de grado $N-1$, donde N es el número de puntos de control. A veces esta lista de números se denomina vector nodal. En este contexto, la palabra vector no significa una dirección en 3D.

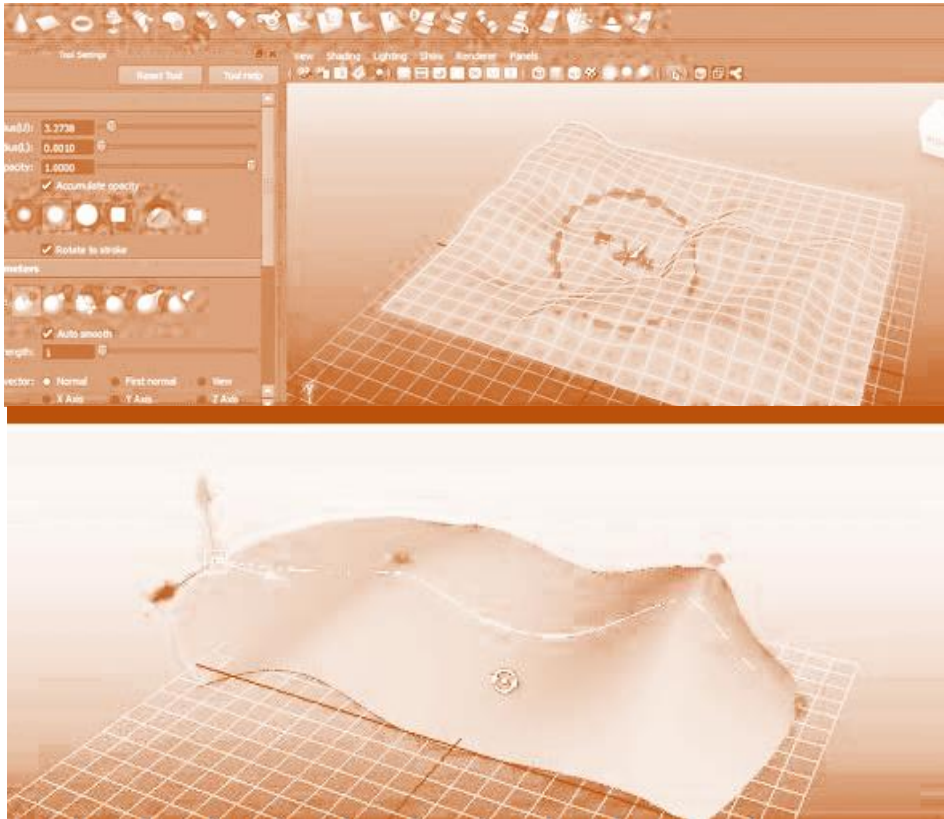


Fig.167: Autodesk. 3D Maya. Modelado con NURBS
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=84jQ1XZuXQw>

MALLAS

Tradicionalmente, las mallas son vistas como una estructura cartesiana, que genera formas estáticas y regulares. Actualmente, en cambio, es una herramienta flexible que puede llevar a formas impredecibles gracias a la informática. Sirve para materializar relaciones complejas, y conexiones entre diferentes variables.

El diseño asistido por computadora está relacionado con la representación, manipulación y diseño de objetos matemáticos, perteneciente a los campos del análisis matemático, la geometría algebraica, el análisis numérico y la geometría diferencial: “Para la representación gráfica de estos objetos matemáticos, no siempre resulta fácil trabajarlos en sus representaciones algebraicas. Una alternativa es trabajarlos mediante aproximaciones y es aquí en donde surge la idea de aproximar una superficie mediante una malla”. (Martínez, 2003, p. 22).

Estas superficies, matemáticamente, responden a ecuaciones diferenciales, a efectos de su representación mediante la informática, la metodología consiste en dividir el dominio de trabajo en una trama con dimensiones de componentes muy pequeños y con una continuidad tal que puede asimilarse a una malla.

La malla permite analizar la superficie como un elemento matemático discreto, siendo en realidad, un elemento continuo³⁰.

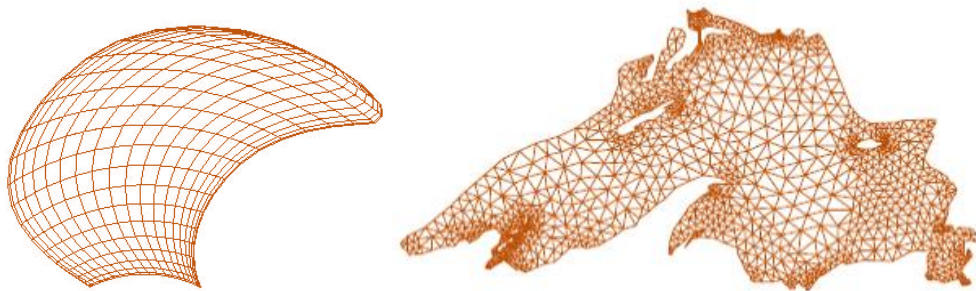


Fig. 168: (a) Malla estructurada; (b) Malla no estructurada

Fuente: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000300016

La discretización del dominio permite que las ecuaciones puedan ser resueltas numéricamente con aproximaciones a las ecuaciones de conservación que dan un estimativo de las variables de interés. Estas ecuaciones diferenciales son linealizadas dentro de los elementos de control, donde las mismas son aplicadas (...). Existen dos tipos de mallas; las estructuradas y las no estructuradas. Una malla estructurada se define como aquella donde cada elemento de control tiene el mismo número de elementos vecinos, mientras que en una malla no estructurada se tienen diferentes números de elementos vecinos. (Martínez, 2003: 22 – 23). Eisenman genera diagramas en base a grillas cartesianas flexibles ,diagramas mediante el “morphing”. Es, por ejemplo, el caso del proyecto para la *Bibliothèque de L’Huei*.

³⁰ “En matemáticas se denomina ‘problema discreto’ al que puede modelizarse utilizando un número finito de componentes y como problema continuo a aquellos en los que, por el contrario, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso del concepto matemático de infinitésimo” Zienkiewicz, O., Taylor, R. (2000) “Finite Element Method” Vo. 3, Butterworth-Heinemann College (ed.), 2000.

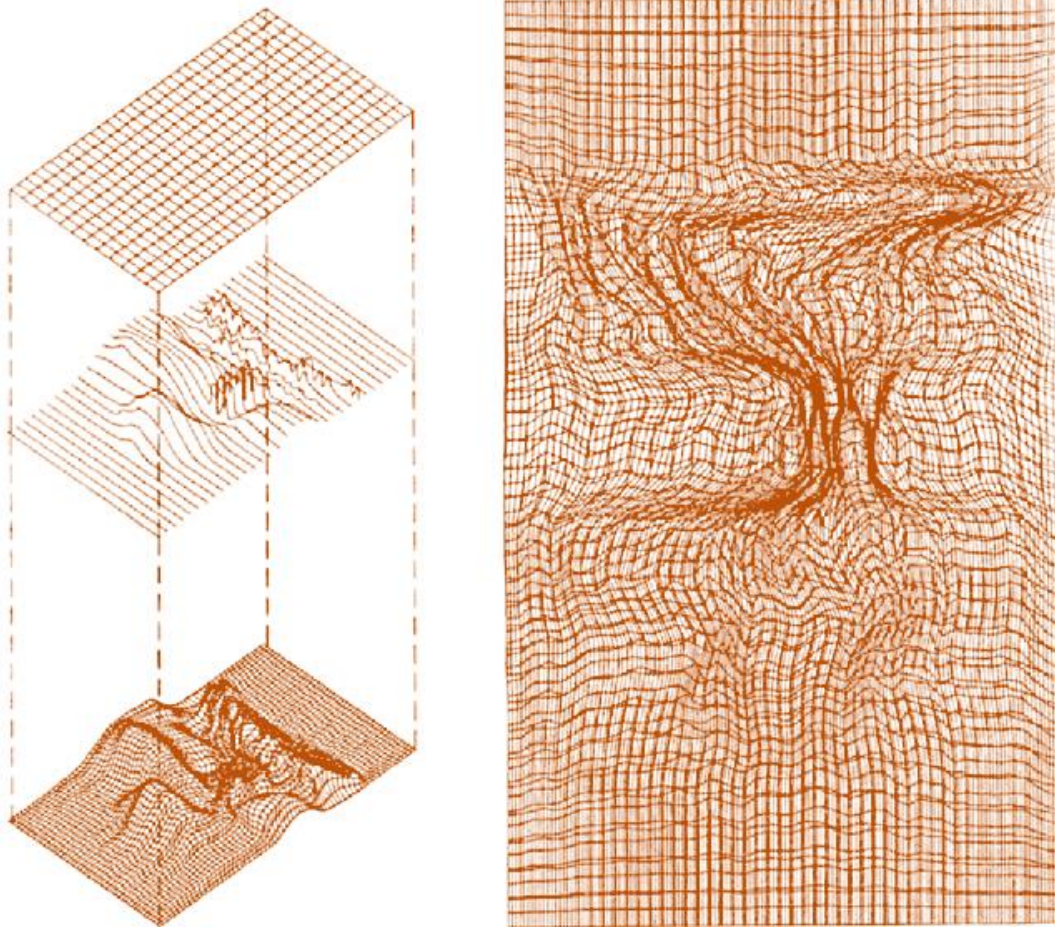


Fig. 169: Peter Eisenman: Superposición de esquemas conceptuales para la Bibliothèque de L'IHUEI, 1996-1997. Fuente: Eisenman (1999: 208). figura fue subida por [Inge Hinterwaldner](https://www.researchgate.net/publication/265173218_Semiconductor%27s_landscapes_as_sound-sculptured_time-based_visualizations/figures?lo=1)
https://www.researchgate.net/publication/265173218_Semiconductor%27s_landscapes_as_sound-sculptured_time-based_visualizations/figures?lo=1

Otro hecho significativo, en lo referente a malla no estructurada, lo constituyeron Ferrater y Canosa en su diseño del jardín botánico de Barcelona, donde implementaron una estrategia espacial basada en una malla triangular irregular, determinando un sistema jerárquico que establece los tamaños de las parcelas para las distintas siembras.

Tomando en cuenta la malla propuesta, se realiza un mínimo movimiento de tierra, a efectos de facilitar la creación de microclimas y condiciones favorables a cada una de las especies del conjunto.

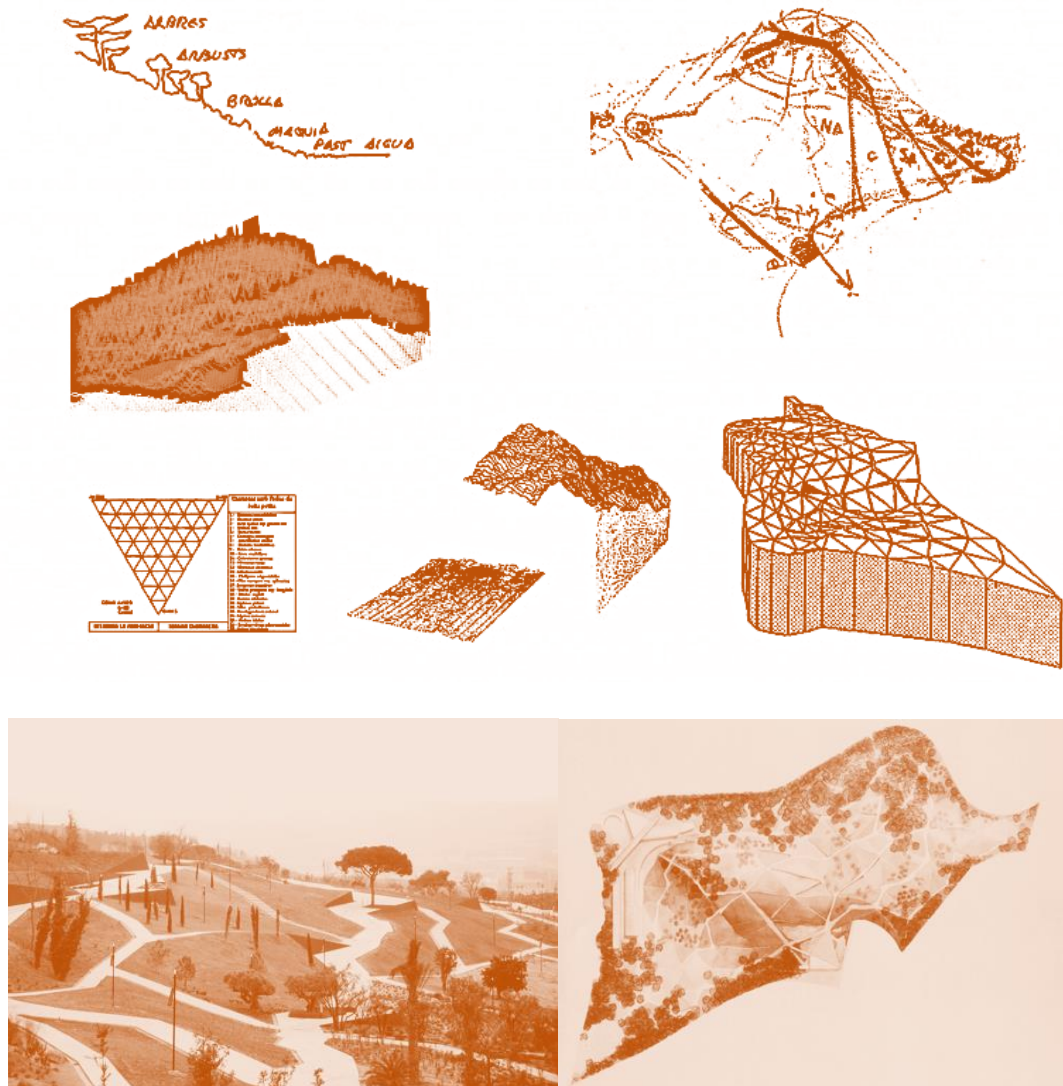


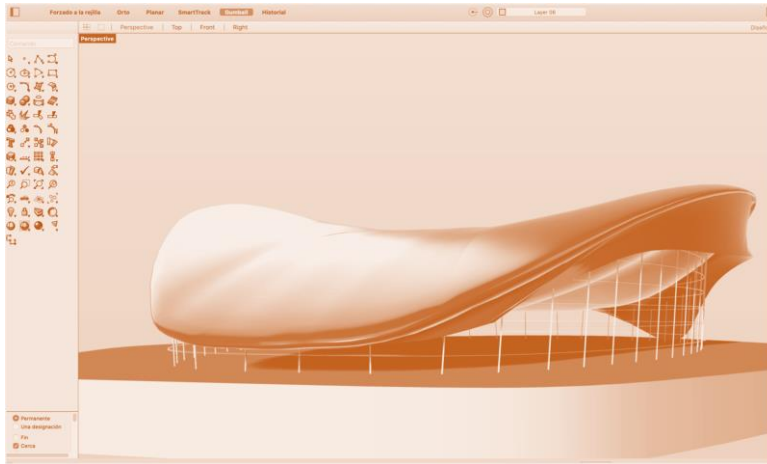
Fig. 170: Jardín botánico de Barcelona

Fuente: <http://ferrater.com/wp->

[content/uploads/1999/04/P_PA_JARDIN_BOTANICO_BARCELONA_C02.jpg](http://ferrater.com/wp-content/uploads/1999/04/P_PA_JARDIN_BOTANICO_BARCELONA_C02.jpg)

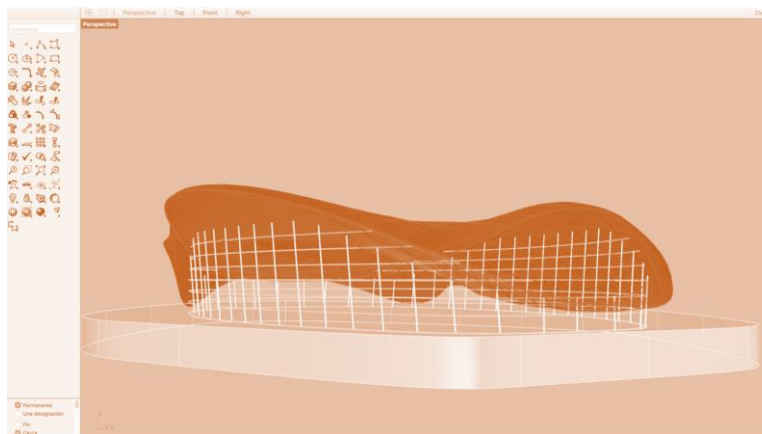
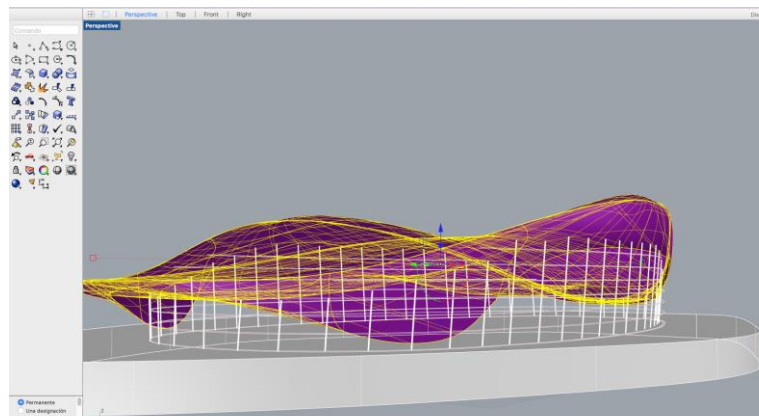
Las mallas cumplen un papel substancial en el diseño posibilitando la morfogénesis digital.

Las mallas son utilizadas por programas, tales como Rhino, que son modeladores de superficies NURBS.



30/5/22, 19:13

IMG-9-MALLAS.png



Generación de superficies mediante mallas
Fuente: Elaboración propia con Grasshopper

III.7. DISEÑO GENERATIVO Y MORFOGÉNESIS

El enfoque biológico y sistémico de las ciencias, la evolución de la tecnología y de la geometría, ha provocado un giro en el entendimiento de la forma pasándose a pensar en morfogénesis en vez de morfología, es decir, no se modela la forma externa, sino que se propone una lógica generativa de la misma que brinda un abanico de posibles soluciones resultantes de las fuerzas interactuantes, originadas por las variables de incidencia del diseño y no por cánones preestablecidos, según la cosmovisión de un momento determinado.

Dentro de este panorama, las herramientas informáticas que en un principio permitían tan sólo la generación de un componente mediante la variación paramétrica de sus partes, con posterioridad habilitaron el acceso a las modificaciones tridimensionales paramétricas, permitido por programas informáticos que brindaron acceso a multiplicidad de soluciones.

Desde la industria cinematográfica se desarrollaría el Maya de AutoDesk, consistente en un programa informático dedicado al desarrollo de gráficos 3D permitiendo la obtención de efectos especiales y animación; en las industrias aeronáuticas se desarrolló el Catia, consistente en un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora, realizado por Dassault Systèmes, con el fin de proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos.

La utilización de estas herramientas en la arquitectura permitió la modificación de la totalidad del proyecto, en función de sus relaciones; nace así un nuevo proceso dinámico de generación del proyecto.

Los procesos generativos digitales han abierto nuevos territorios para la exploración conceptual, formal y tectónica, proponiendo una morfología arquitectónica centrada en las propiedades emergentes y adaptables de la forma.

“El énfasis se desplaza de la ‘construcción de la forma’ hacia el ‘descubrimiento de la forma’, procesos a los que inducen intencionalmente diversas técnicas generativas basadas en lo digital. En el reino de la forma, lo estable es sustituido por lo variable, la singularidad por la multiplicidad.” (Kolarevic, 2000. Introducción).

De la lógica de una física determinista y estática, se pasará a una lógica biológica de optimización y eficiencia que incluye el movimiento y el tiempo; lo cual provocará “un desplazamiento desde una arquitectura basada en preocupaciones puramente visuales hacia una arquitectura que encuentra su justificación en su *performance* (eficiencia)” (Leach, 2009, p. 32), entendida en sentido amplio y no solamente tecnológico, constructivo y estructural.

Las formas de la arquitectura compleja surgirán tanto de las interrelaciones entre variables intrínsecas al proyecto, como de aquellas generadas entre éstas con las condiciones socio culturales y el medio ambiente, es decir, las interrelaciones entre componentes conforman una red abarcativa del todo. Esta red, mediante la implementación de estrategias generativas, producirán una abultada población de respuestas morfológicas en la que están presente sujeto y objeto, aleatoriedad, incertidumbre, indeterminación y la búsqueda constante de la optimización.

Nada tiene que ver con la forma como figura exterior o apariencia visual, como contorno o silueta, ni mucho menos con la forma como género o estilo artístico. La concepción que se adopta como seminal es la de la forma entendida como estructura esencial e interna, como construcción del espacio y de la materia. Las formas refractan una cosmovisión del ser humano, en consonancia “con las reflexiones filosóficas, con los paradigmas científicos y con la continua evolución de la sociedad. (Montaner, 2002, p. 9).

Llegado a este punto, se hace necesario explorar el concepto de morfogénesis, el porqué del pasaje de la morfología a la morfogénesis y la incidencia de esta en el diseño generativo.

La Real Academia Española (RAE) todavía no brinda una definición de morfogénesis, aunque sí de morfología dando cuatro acepciones del término:

1. Forma o estructura de algo.
2. Parte de la biología que trata de la forma de los seres orgánicos y de las transformaciones que experimenta.
3. Parte de la geografía que estudia las formas de la superficie terrestre.

4. Parte de la gramática que estudia la estructura de las palabras y de sus elementos constitutivos.³¹

Tomando en cuenta estas acepciones, se podría decir que la morfología en arquitectura, atañe tanto al lenguaje como a la forma. Pensarla como lenguaje en el diseño, es entenderla como herramienta de comunicación de la cosmovisión de una determinada comunidad con su aquí y ahora, utilizando los elementos y conceptos que el paradigma de esa sociedad ha generado, mientras que entenderla desde la forma, implica estudiar su geometría.

En capítulos anteriores se analizó como los estudios de D'Arcy Thompson y Robert Ricolais condujeron paulatinamente al abandono del protagonismo de la física newtoniana, para abordar el diseño estructural desde las conceptualizaciones de la biología asumiendo sus cambios y transformaciones, incluidas las derivadas de los intercambios con el medio, dando un paso más hacia la complejidad y estructurando la física – matemática ya no en forma estática, sino dinámica, generando la forma.

Esta concepción desembocó en lo que hoy llamamos morfogénesis.

Para D'Arcy Thompson, la forma de un objeto o de una porción de materia es un diagrama de fuerzas.

“La forma es el resultado de la acción simultánea de la fuerza interna de cohesión intermolecular y de la fuerza externa debida a la gravedad, que produce la fricción del objeto o porción de materia respecto a aquello con lo que entra en contacto en sus movimientos. Estas fuerzas son responsables de la conformación del organismo; su permanencia formal resulta del equilibrio de las fuerzas actuantes.” (Cortés, 1998, p. 2).

Permaneciendo en la línea de Thompson, los estudios de Le Ricolais refieren a “la exploración de la naturaleza con el auxilio de la teoría matemática” (Juárez, 1996^a, p. 2); su trabajo consiste en “descubrir la relación entre la estructura de la naturaleza y la estructura de la forma, la geometría construida por el hombre.” (Juárez, 1996^b, p. 73).

³¹ <https://dle.rae.es/morfolog%C3%ADa>

Le Ricolais indaga sobre topología y naturaleza, anticipándose a la concepción del pensamiento complejo al introducir una serie de pares de conceptos aparentemente opuestos, como rigidez y fragilidad, pesadez y ligereza.

El término morfogénesis, etimológicamente, supone la generación de la forma; el Gran Diccionario de la Lengua Española, expresa que para la fisiología, “la morfogénesis es el proceso de formación de las estructuras de los organismos”³².

En tanto que Leach (2009), especifica que si bien el término morfogénesis fue usado inicialmente por la biología, refiere a la lógica de la generación formal y a los procesos de crecimiento de un organismo.

Con el auge de la informática, Thompson vuelve a estar en el candelero ante la definición de nuevos modelos de generación formal, mediante la utilización de algoritmos informáticos que permiten la gestación y variabilidad de las formas en respuesta a los requerimientos del espacio y su entorno. A este tipo de búsqueda de la forma en respuesta de las condiciones propias de la obra en su entorno, mediante el empleo de algoritmos informáticos es lo que Kolarevic denomina “morfogénesis digital”, en la Introducción de su paper del 2000, “Morfogénesis digital y Arquitecturas Computacionales.

Para Branco Kolarevik, el término morfogénesis, en arquitectura, refiere al concepto de generación digital de la forma, utilizando las herramientas computacionales como herramientas para la exploración de las formas y su transformación a efectos de tomar decisiones valorativas, teniendo en cuenta una respuesta adecuada a las características del contexto; esta forma de trabajo, establece un nexo entre la arquitectura y ciertos procesos morfogenéticos de la biología.

Greg Lynn (1954), en la década del noventa, insiste en que las fuerzas externas son responsables de la configuración del objeto arquitectónico, afirmándose en el concepto morfogenético del diseño, indaga acerca de nuevos modelos de concepción y generación formal, inspirándose, entre otros, en D' Arcy Thompson quien desarrollase el método de deformación cartesiana para describir las transformaciones de la forma natural en respuesta a las fuerzas del entorno.

³²Gran Diccionario de la Lengua Española © 2016 Larousse Editorial, S.L.<https://es.thefreedictionary.com>

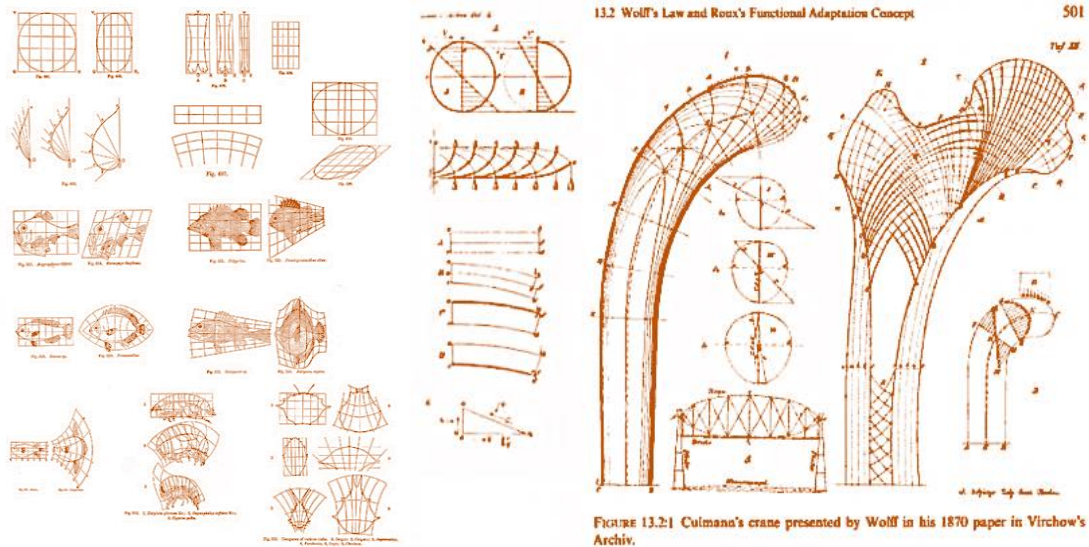


Fig. 171: D'Arcy Wentworth Thompson sobre la aplicación de las matemáticas a la forma biológica y evolutiva. Diagramas paramétricos que describen diferentes especies a medida que evolucionan variaciones de la misma topología.

Fuente: Imágenes reimprimadas de D'Arcy Wentworth Thompson, *On Growth and Form* (Cambridge, Reino Unido: University Press, 97), 038-0, 057, 059, 06-06.

Al respecto Lynn afirma que: “De este modo, el tipo u organismo espacial no es considerado ya como un todo estático separado de las fuerzas externas, sino más bien como algo sensible a transformarse continuamente a través de la internalización de los acontecimientos exteriores”. (Lynn, 1992).

Estos desarrollos de Lynn, derivaron en sus conceptualizaciones de la “forma animada”, noción que se basa en una interpretación dinámica del espacio con participación del tiempo, donde la forma es el resultado de las fuerzas incidentes y cambiantes del objeto arquitectónico.

Los procesos generativos digitales han abierto nuevos escenarios para la exploración conceptual, formal y tectónica, proponiendo una morfología centrada en las propiedades emergentes, cambiantes y adaptables de la forma, implicando generalmente, una salida de las geometrías euclidianas, lo que no significa que no se haga uso de ellas de ser necesario o se las descarte.

En estos desarrollos han sido de vital importancia para establecer conceptos matemáticos tales como los desarrollos topológicos, la definición paramétrica de funciones, curvas *B-Spline*, *Spline*, Bézier y superficies Nurbs, ya abordadas en esta tesis, así como las superficies isomórficas,

Las superficies isomórficas, también llamados *Blobs*, constituyen objetos amorfos partiendo de ensamblajes compuestos por objetos paramétricos; representan otro punto de salida de la geometría euclidiana y el espacio cartesiano, siendo herramientas de modelado de objetos de tipo orgánico. El modelado con *Blobs* consiste en colocar un conjunto de primitivas básicas (esferas, cubos) que forman el “esqueleto” del objeto. Dicho modelado puede realizarse con numerosas técnicas como, por ejemplo, con curvas tipo Bézier.

La arquitectura isomórfica implica la utilización en su generación de superficies isomórficas

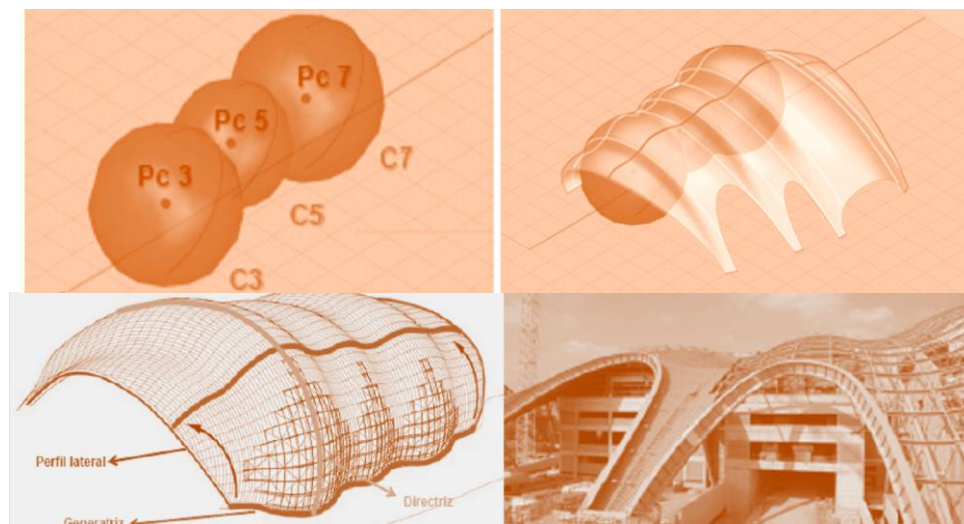


Fig. 172: Desarrollo geométrico sobre Sage Gateshead, (2004) de Norman Foster utilizando superficies isomórficas
Fuente: Elaboración propia

Lynn hilvana un discurso que se afirma contra los paradigmas de la cultura arquitectónica precedente. El movimiento es, siempre según Lynn, algo añadido a una arquitectura estática, él propone la forma animada, “concebida en un espacio de movimiento virtual” y de modo que “la arquitectura pueda modelarse no como un marco sino como un móvil que participa en los flujos dinámicos”. Es un entendimiento dinámico del espacio, en el que la forma es el resultado de unas fuerzas direccionales y cambiantes, que pueden dar lugar a una situación de estabilidad pero no de estatismo. Y es un concepto de forma fundamentado en las técnicas de animación por ordenador.

En este sentido Greg Lynn fue -además- uno de los primeros arquitectos en utilizar el *software* de animación, no como un medio de representación, sino como herramienta útil en la generación de la forma.

“Animación es un término que difiere de movimiento. Mientras que la noción de movimiento implica desplazamiento y acción, la animación implica la evolución de una forma y sus fuerzas constituyentes” (Lynn, 1999, p. 1).

Las particularidades de la forma tienen su origen en las fuerzas actuantes en el objeto que modelarán las formas del mismo

Lynn, llevando este concepto al espacio arquitectónico, expresa:

“Tradicionalmente, en la arquitectura, el espacio abstracto del diseño ha sido concebido como un espacio idealmente neutral, delineado bajo rígidas coordenadas cartesianas. Empero, en otros campos de diseño, el espacio de diseño se concibe como un contexto de fuerza y moción, más que como un vacío neutral (...). Las formas pueden ser creadas a través de la colaboración entre una envoltura y el contexto en el que se encuentra.” (Lynn, 1999, p. 1).

Para el modelado de sus proyectos, Lynn utiliza técnicas basadas en el movimiento como son la cinemática directa e inversa o la dinámica basadas en el movimiento, entre otros.

La simulación dinámica considera los efectos de las fuerzas que actúan en el movimiento de un objeto o sistema de objetos, sobre todo de las fuerzas externas al sistema mismo.

Las propiedades físicas de los objetos, tales como la densidad, la elasticidad o la fricción estática, entre otras, se pueden calcular. A estas propiedades se les aplica otras fuerzas externas al sistema, por ejemplo, viento o detección de colisiones y se calcula la simulación.

Los cálculos que viabilizan la obra de arquitectura de la forma descrita, solo son posibilitados mediante la utilización de algoritmos que no son otra cosa que funciones matemáticas fundadas en la topología y la geometría diferencial.

En el proyecto del *Port Authority Bus Terminal* (1995), Lynn -mediante simulación 3D de campos de fuerza-, representó flujos de personas y vehículos para plasmar las diferentes intensidades de movimientos.

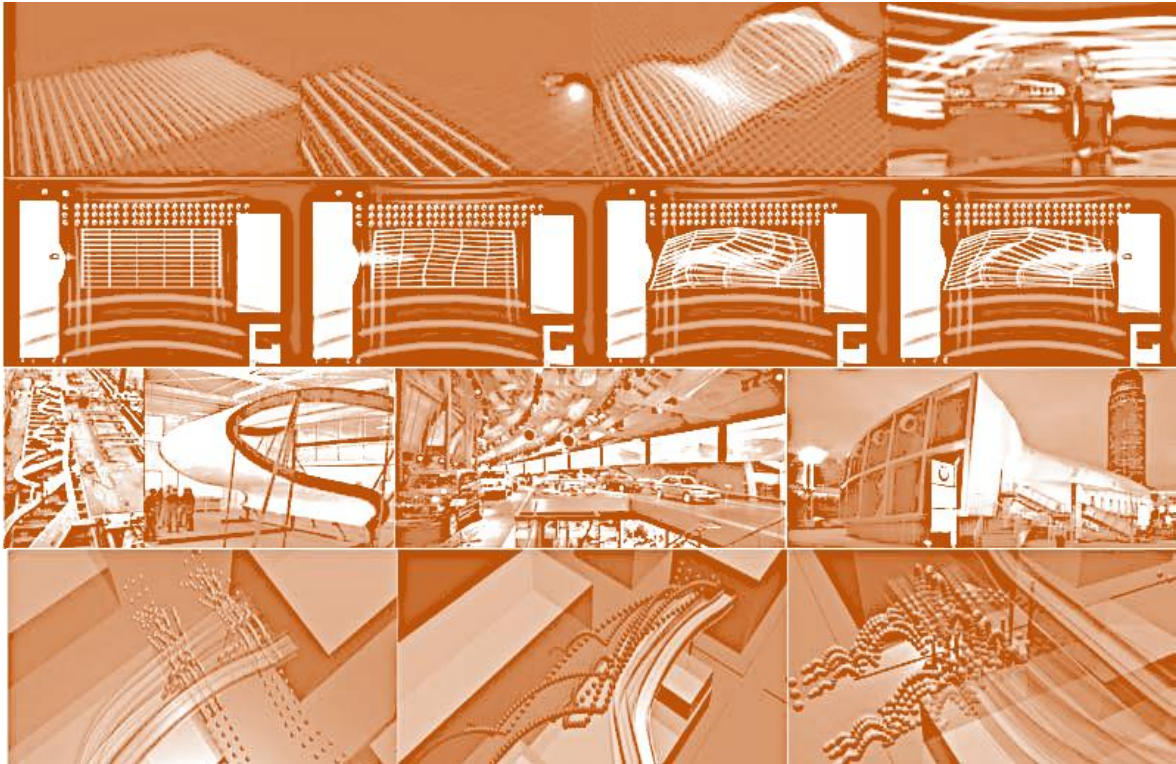


Fig. 173: Terminal "Port Authority", Greg Lynn, 1995.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Terminal-Port-Authority-Greg-Lynn-1995-3d-simulation-using-force-fields_fig1_30870722

Otro concepto fundamental de la morfogénesis con implicancia en el diseño generativo es la topología. La definición de una determinada topología, en la arquitectura compleja, implica la inclusión de gran cantidad de variables intervinientes con sus cualidades y la manera en que dichas variables interactúan entre si con el fin de crear una estructura que incluye el espacio que se genera y el espacio vacío generado, además de la influencia y modificación del espacio del suprasistema al que pertenece la obra considerada. Se toman en cuenta todos los estados del espacio, incluyendo el vacío y la materia.

Los cambios y evoluciones de la forma son esenciales para su comprensión. Gracias a la informática se puede simular la evolución de estas estructuras y reproducir sus movimientos hipotéticos.

Cada resultado se manifiesta como la simulación de “otras posibles” combinaciones y así sucesivamente.

“Nos hemos asomado fuera del borde del espacio continuo, allí en el infinito y hemos visto su revés. Conceptualizamos el espacio de manera diversa a como se entendía el espacio reticular. No tenemos una definición geométrica sino topológica”. (Letelier Lara, 2011, p. 3).

Referirse a la topología supone que ya no hay un *a priori*, ni formas, ni construcciones geométricas subyacentes.

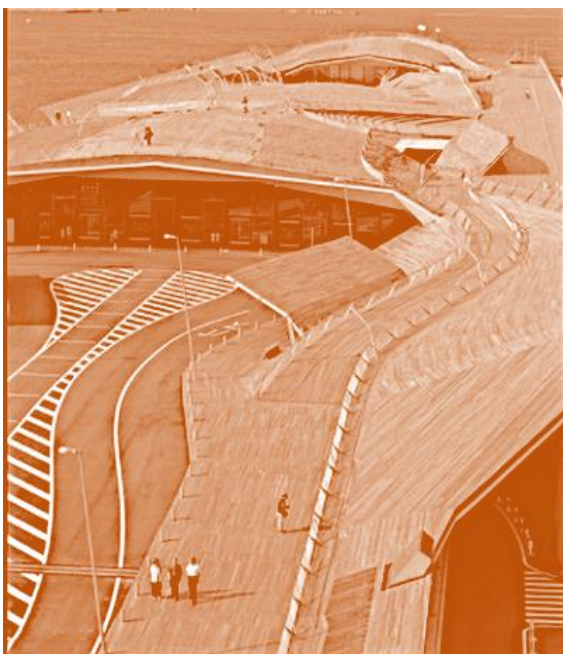
La terminal internacional en la *Waterloo Station* de Londres (1988-1993) de Nicholas Grimshaw es una superficie continua que, por medio de variaciones paramétricas, se adapta al recorrido curvo de las vías de los trenes. El cambio en los parámetros que determinan esta forma se propaga en los 36 arcos que componen el recorrido.

Lo que refiere a arquitectura paramétrica, algorítmica y evolutiva, se desarrollará al analizar las estrategias de la arquitectura compleja.

Se puede decir que la arquitectura paramétrica propone los parámetros de un objeto, no su forma. Mediante la asignación de valores diferentes de los parámetros de diversas ecuaciones, se pueden crear fácilmente diferentes objetos o configuraciones.

Las ecuaciones llegan a describir las relaciones entre los objetos, definiendo así una geometría asociativa, es decir, la geometría subyacente a la forma. De esta manera, las interdependencias entre los objetos se pueden establecer, y se puede definir su comportamiento mientras suceden las transformaciones.

La arquitectura algorítmica se basa en la utilización de algoritmos genéticos y generativos, mientras que la arquitectura evolutiva utiliza algoritmos genéticos, consistentes en la búsqueda de procedimientos tomando como modelo los procesos biológicos.



El diseño generativo también ha contribuido a las transformaciones topológicas de superficies.
La terminal de Yokohama
(Fig. 174: Terminal de Yokohama)

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.com>

995-2002) es el resulta de la transformación de una superficie de doble curvatura continua sometida a variados flujos circulatorios, mientras que en el Water Pavilion (1994-1997) de Lars Spuybroek (1959) se parte de una superficie reglada.

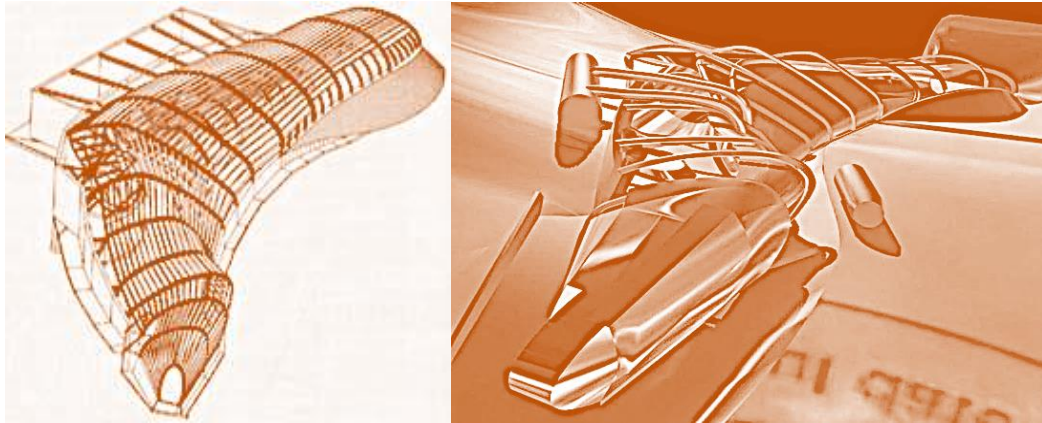


Fig. 175: Centre. Water Pavilion (1994-1997), Lars Spuybroek. Fuente: Collection FRAC

La terminal internacional en la *Waterloo Station* de Londres (1988-1993) de Nicholas Grimshaw (1939) es una superficie continua que, por medio de variaciones paramétricas, se adapta al recorrido curvo de las vías de los trenes. Los 36 arcos que componen el recorrido se obtuvieron por la manipulación de los parámetros determinantes de la forma.

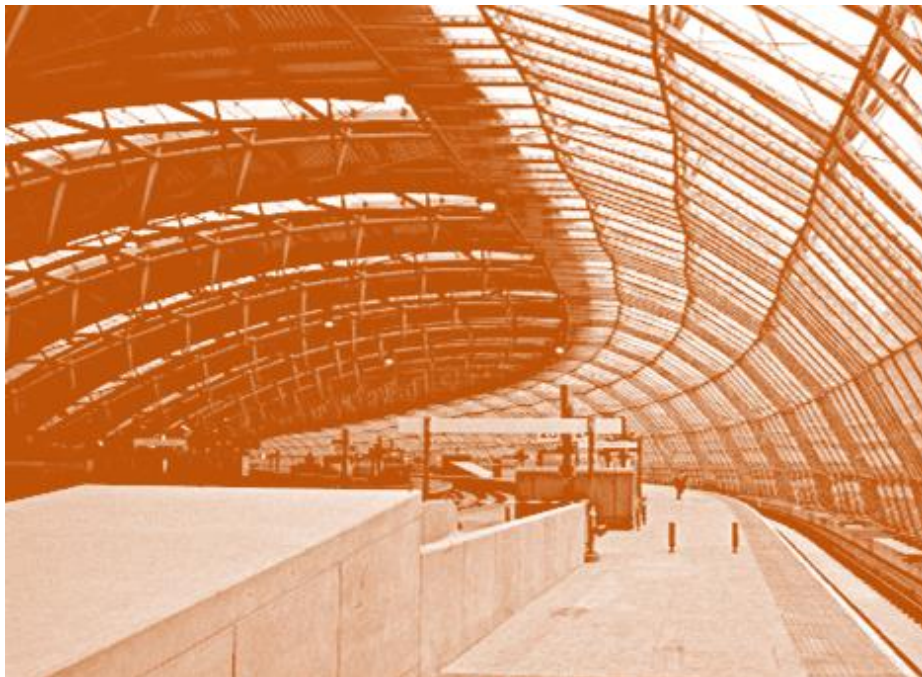


Fig. 176: Waterloo Station de Londres (1988-1993) de Nicholas Grimshaw.
Fuente : <https://www.yumpu.com/en/document/view/15779537/nicholas-grimshaw-waterloo-station-international-terminal->

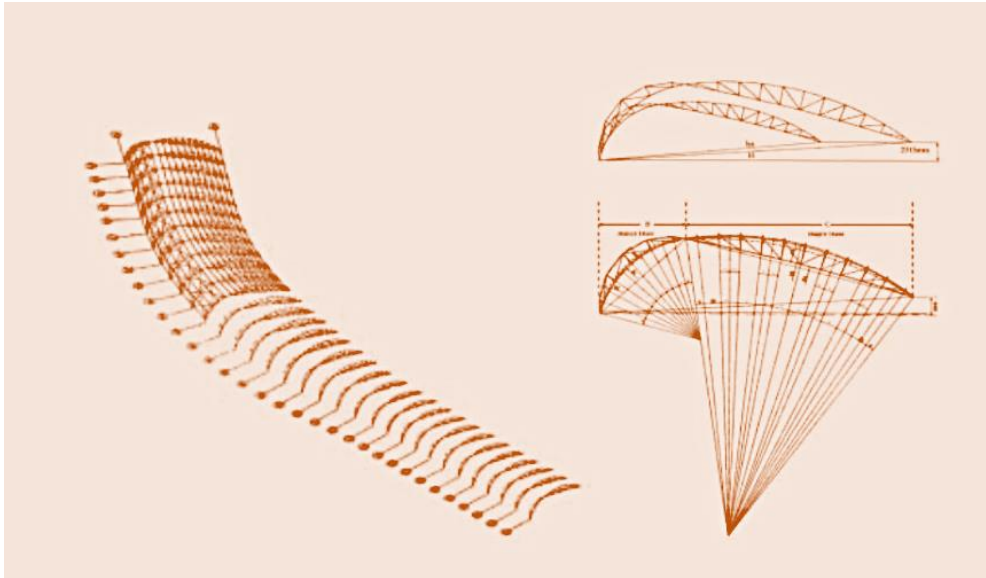


Fig. 177: Waterloo Station de Londres (1993) Nicholas Grimshaw. Modelo paramétrico de un arco (Generative Components). Fuente: Kolarevic, 2003.

Pero la simple manipulación de las formas no son suficientes para encarar la configuración espacial de la Arquitectura Compleja por lo que se debió implementar otras metodologías paramétricas del campo de la ingeniería, a efectos de responder constructiva y estructuralmente, a las necesidades intrínsecas y ambientales del proyecto; los estudios de arquitectura debieron trabajar en forma conjunta con las más diversas disciplinas: informática, matemática, económico financiera, social, etc., implementando nuevas metodologías para el cálculo y análisis de superficies, utilizando la discretización de las mismas, para lo cual emplearon programas como el CAE, sigla en inglés que significa “Ingeniería Asistida por Computadora”, el CFD o Dinámica de Fluidos Computacional que permite evaluar la incidencia del viento en las construcciones, estableciendo gradientes de presión y temperatura en los distintos puntos.

Dos proyectos de Norman Foster, muestran cómo la tecnología utilizada para la optimización de respuestas a las fuerzas de incidencia del proyecto, derivan en estéticas no convencionales y al mismo tiempo aportan nuevas formas de expresión simbólica.

En el *City Hall* de Londres (2002), tanto el revestimiento como el corrimiento de los centros de secciones de circunferencia de las diversas plantas son una respuesta directa a la incidencia de los rayos solares y el ahorro energéticos.

En "The Gherkin" de Londres (2002 – 2004), Foster, mediante métodos de ahorro de energía basados en cálculos matemáticos, logra que el edificio use sólo la mitad de la energía que consumiría una torre prismática convencional de dimensiones similares.

Su forma definitiva se logra mediante un exhaustivo estudio de vientos respondiendo a la parametrización de funciones teniendo en cuenta las rotaciones que luego se evidenciarán en fachada.

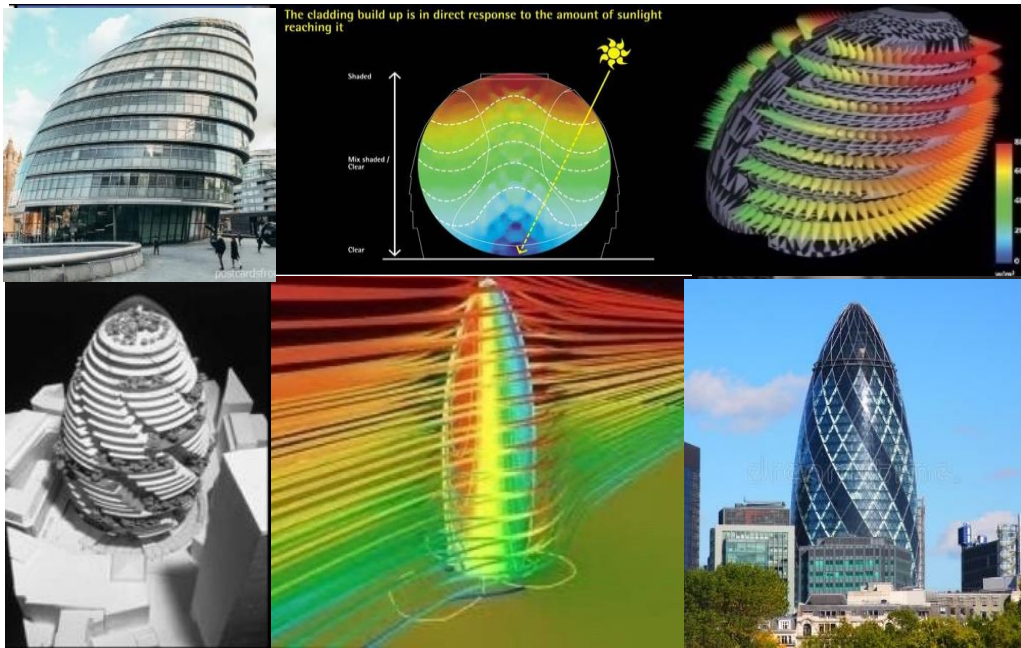


Fig. 178: City Hall, estudio de energético
Pepinillo de Londres, estudio de vientos y aprovechamiento energético
Fuentes: <https://www.pinterest.cl/pin/134193263885180764/>
Fuente: <https://www.pinterest.cl/pin/509610514085721741/>

Durante los años considerados encontramos una gran producción de obras icónicas, al mismo tiempo que optimizadas energéticamente e innovadoras estructuralmente.

Uno de los grandes avances estructurales permitidos por la informática fue poder calcular tanto superficies continuas como discretas, mediante el método FEM.

DISCRETIZACIÓN: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Cálculo estructural y ambiental

Matemáticamente, el *método del elemento finito* es un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, para la resolución aproximada de problemas continuos, basada en la discretización del dominio del problema en subdominios llamados elementos, permitiendo considerar a la superficie

continua como una malla de puntos discretos (número finito de puntos) a efectos de un análisis aproximado. La generación de la malla se realiza con programas especiales previo al desarrollo de los cálculos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo, también regirán a cada elemento planteado en la malla; así se pasa de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

Este método numérico se ha desarrollado en los últimos tiempos gracias al surgimiento de diversos *software* que permiten el análisis por elementos finitos de un variado espectro de fenómenos físicos tales como esfuerzos, deformaciones, vibraciones, flujo de fluidos y distribuciones de temperatura.

El primer paso hacia el FEM, lo dio Alexander Hrennikoff (1941) y Richard Courant (1942) para solucionar problemas de análisis estructural en la ingeniería aeronáutica. Consideraron la superficie constituida por una malla de elementos interconectados: líneas y nudos, lo cual permitió calcular el comportamiento estructural de la malla. Posteriormente, Turner y otros científicos, obtuvieron matrices de rigidez para armaduras, vigas y otros elementos.

Por su parte, el primero en utilizar la expresión “elemento finito” fue Ray William Clough (1920 – 2016) en 1960 y en 1967 Olgierd Cecil Zienkewicz (1921 – 2009) y Tzau-Jin Chung publican “The finite Element Method”, primer libro de elementos finitos. A partir de 1980, se empleó en programas comerciales que modelan mallas tridimensionales.

El avance tecnológico ha realizado dos aportes que condujeron a la utilización masiva del método en la población de profesionales de la arquitectura y la ingeniería. La informática posibilita, tanto la resolución del gran número de ecuaciones que se plantean en el FEM, como el desarrollado de paquetes gráficos que facilitan la discretización y la síntesis de resultados.

El primer paso para la resolución por elementos finitos consiste en la discretización del elemento, ya sea de 1D, 2D o 3D, para lo cual existen programas específicos además de espacios virtuales como el FEM: Biblioteca de discretización para elementos finitos de la organización MEM, cuyo objetivo consiste en permitir la investigación de discretización

de elementos finitos escalables de alto rendimiento y el desarrollo de aplicaciones en una amplia variedad de plataformas, que van desde computadoras portátiles hasta supercomputadoras.

El espacio FEM proporciona los componentes básicos para desarrollar algoritmos de elementos finitos de una manera similar a la de MATLAB (software matemático) para métodos de álgebra lineal.

La figura que sigue muestra la gráfica de la ecuación de Laplace en dos dimensiones parametrizada en función de “t” y su representación en 3D obtenida mediante discretización.

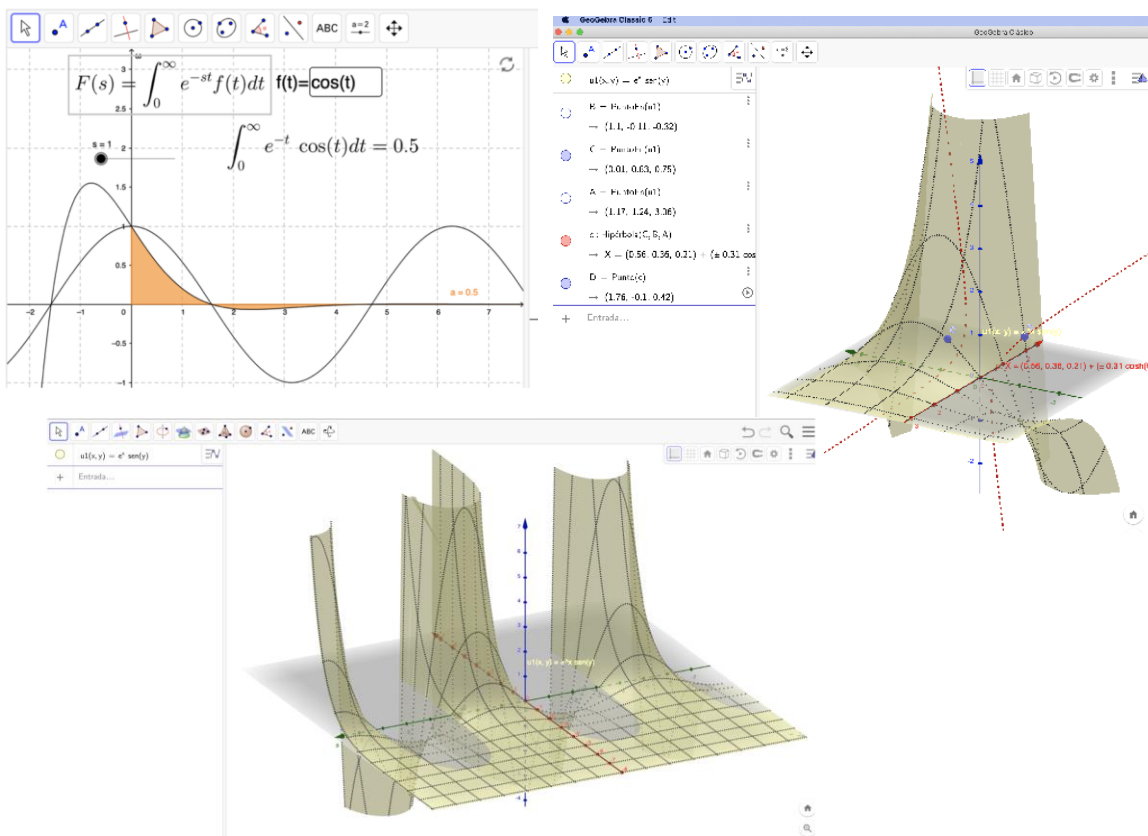


Fig. 179: ecuación de Laplace

Dentro de los paquetes computacionales de mercado, más populares en Argentina, podemos mencionar el “Auto FEM Análisis” de Auto Desk, más utilizado por ingenieros que trabajan en el campo del diseño mecánico y estructural y el Grasshopper, *plugin* de Rhinoceros, que además de ser un programa de modelado por algoritmos, cuenta con diversos *plugin* para el cálculo de diversas variables del diseño como la energética o la estructural.

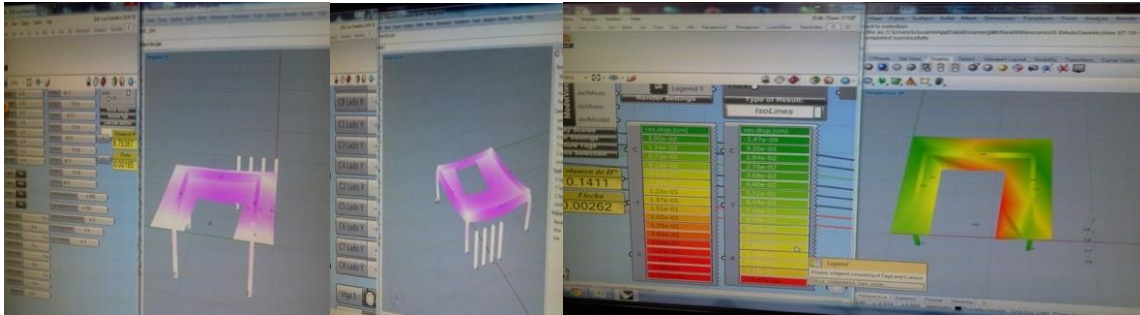


Fig. 180: Estudio estructural paramétrico realizado por en el Seminario: “Diseño estructural paramétrico” dictado por el Ing. Jorge Farez. Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UNLP (2015)

El modelado formal sujeto a condiciones técnicas, estructurales, constructivas, energéticas, simbólicas y perceptuales, permiten la “huida” de la geometría euclídea, en búsqueda de la formalización del hecho arquitectónico que se acerque con mayor precisión a esas restricciones iniciales y a las emergentes que surjan de sus interrelaciones, cosa que posibilita el diseño generativo.

Las figuras muestran la discretización y concreción de la sede central del Universal Museum Joanneum en Graz, proyecto de Peter Cook y Colin Fournier.

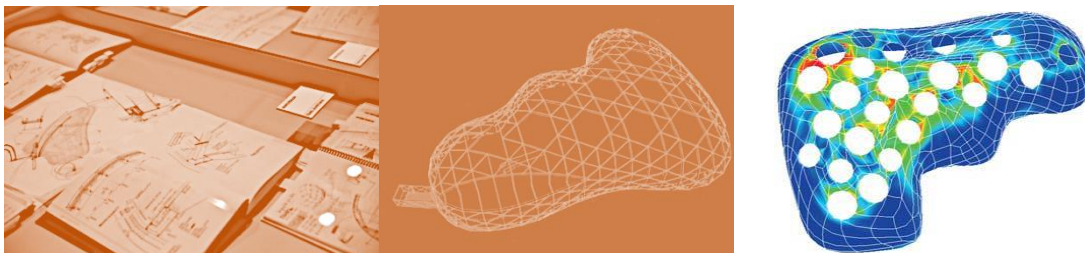


Fig.181: Modelo digital, triangulación de la estructura y análisis estructural (FEM).
Fuente: (Kloft, 2005). Foto: Universal Museum Joanneum/J.J: Kucek



Fig. 182: *Universal Museum Joanneum*/J. J: Kucek. Proyecto de Peter Cook y Colin Fournier
Fuente: Cortesía *Universalmuseum Joanneum*/J. J. Kucek

Existen otros métodos de resolución estructural tal como el *soap-film analysis* (análisis mediante películas de jabón) aplicado por Norman Foster y Buro Happold en el *British Museum Great Court Roof* (1997–2000) obteniendo una cubierta ligera de doble curvatura, donde la geometría se convierte en la misma estructura.



Fig.183: Museum Great Court Roof

Fuente: <https://www.britishmuseum.org/about-us/british-museum-story/architecture/great-court>

Estas formas de abordaje del proyecto han dado lugar al desplazamiento de la morfología en la arquitectura, para establecer la morfogénesis en la generación y evolución del proyecto.

III.8. ESTRATEGIAS PARA LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ARQUITECTURA COMPLEJA

A partir de la década del noventa van adquiriendo peso, en el diseño, las características psicológicas y perceptuales, es decir, se parte de un concepto sistémico de abordaje. Antes de los noventa no existían las herramientas tecnológicas que pudiesen abarcar en el diseño esta postura, que incluye gran cantidad de variables constitutivas del proyecto, inherentes a la obra o sus interrelaciones con el entorno.

Es el 12 de agosto de 1981, cuando la empresa IBM lanza la primera PC al mercado; a partir de esa fecha, los grandes estudios de arquitectura acceden a ellas y contratan equipos de especialistas para indagar sobre la incidencia que esta nueva tecnología podía incidir en el diseño la disciplina.

Fue en esa década que -en las investigaciones informáticas aplicadas al diseño- se incluyeron procesos de mutación y reproducción presentes en la evolución de las especies; es decir, se tomó como modelo la lógica biológica y no exclusivamente la newtoniana.

Será con la instauración del pensamiento complejo y las Ciencias de la Complejidad, que el paradigma, en una retroalimentación constante, creará la tecnología que permita el abordaje de la arquitectura con un espacio que obedezca a las concepciones del paradigma vigente, con lo que ello implica.

Poder realizar el abordaje del diseño desde esta postura, implicó la utilización de nuevas metodologías de diseño, dado que la complejidad no se guía por rígidos programas, sino que genera estrategias que permitan obtener una multiplicidad de soluciones aptas, basadas en la multiplicidad de variables intrínsecas del proyecto, sus interrelaciones y las interrelaciones de aquellas con el medio.

Las herramientas de diseño digital se liberaron de la limitación de la sola producción de planos finales, mediante “la implementación de modelación tridimensional, herramientas de análisis y manufactura para abordar el diseño de los edificios y estructuras actuales, utilizando los recientes desarrollos paramétricos y geometría asociativa que pueden variar de acuerdo a los conceptos definidos por el diseñador” (SHEAA K, 2005).

La conciencia de la complejidad y la diversidad, de la fragmentación y del caos en el mundo contemporáneo, impulsa a experimentar nuevos sistemas que superen la rigidez de las creaciones anti sistémicas en búsqueda de absolutos, tendientes a una única solución.

Tres estrategias de diseño son una constante para la configuración espacial de la arquitectura compleja, donde cada proyectista imprime su huella:

1. El diagrama
2. Los algoritmos genéticos y generativos
3. El diseño paramétrico.

DIAGRAMÁTICA

En la búsqueda de nuevos sistemas de análisis y proyecto, los arquitectos de la últimas dos décadas del siglo XX, nutridos por las teorías de Deleuze, Guattari y Foucault, comienzan a reinterpretar los mecanismos iconográficos utilizados por exponentes “racionalistas”, basados en conceptos matemáticos, como por ejemplo, los diagramas de burbujas realizado por primera vez en 1929 por Le Corbusier o los esquemas de Christopher Alexander (1936 – 2022), entre otros.

Las nociones de topología serán protagonistas de esta estrategia de configuración proyectual. Deleuze y Guattari, al referirse a las nociones de espacio topológico y espacio métrico expresan que mientras que en los espacios métricos las nociones de “longitud” o “área” permanecen inalteradas a lo largo de las operaciones geométricas que tienen lugar en ellos, en los espacios topológicos los invariantes son la dimensionalidad del espacio y su conectividad (Deleuze & Guattari, 2004).

Entre los años setenta y noventa, a efectos de enfrentar la realidad compleja y caótica que ya no podía ser interpretada desde el pensamiento de la simplificación, los filósofos mencionados anteriormente, elaboraron una serie de teorías en las que presentaron herramientas conceptualizaciones que permitieron encarar los acontecimientos del nuevo contexto; es así que plantearon la importancia del diagrama como elemento de comprensión holística de objetos y sucesos.

Para Josep Maria Montaner “los diagramas parten de un proceso mental que intenta interpretar la realidad, reduciendo contextos de complejidad creciente y tienen como

objetivo establecer esquemas geométricos capaces de transformarse”. (Montaner, 2010, pp. 131- 132)³³.

Desde el urbanismo, en los ochenta y noventa los diagramas, valiéndose de estadísticas descriptivas e inferenciales, mediante la manipulación de variables cuantitativas y cualitativas, cumplieron un papel fundamental en las investigaciones, gracias a la capacidad de cálculo que posibilitó el avance tecnológico.

En esos años, la condición de la arquitectura ya estaba marcada por la progresiva y acelerada irrupción de la “era de la información” y de los diversos requisitos e intenciones heterogéneas, con respecto a lo específicamente disciplinario.

Aquí, se acentúa el rol del diagrama dada la forma de interrelacionar los fenómenos más o menos complejos; a raíz de la necesidad de interrelacionar las distintas concepciones se acentúa el rol del diagrama en el desarrollo del proyecto.

El diagrama fue posicionándose como nuevo instrumento de comprensión de los hechos, alimentando de este modo el nuevo paradigma de diseño.

Stan Allen, en 1997 publicó en la revista *Architectural Design: “From object to field”*, mientras que, en un número dedicado a la aplicación de la informática en el proceso de diseño: *“Architecture After Geometry”* y en la revista *ANY Architecture New York*, 23 de 1998 publicó *“Diagrams Matter”*.

En sus teorías, Allen propone una mirada de la arquitectura a través del “dinamismo de las fuerzas” y presenta una serie de diagramas, los cuales expresan el comportamiento complejo y dinámico de los usuarios. Su búsqueda se centra en hallar una organización dinámica, que no imponga una estructura rígida, sino que responda de modo sensible a los vectores interactuantes en el proyecto; cada proyectista ya no se centrará en la simple forma sino en la forma en que estos vectores se relacionan.

En los primeros años del nuevo siglo, el diagrama es ponderado y utilizado por las Ciencias de la Complejidad; en la arquitectura, específicamente, intenta que la cualidad arquitectónica emerja espontáneamente.

³³ El diagrama se torna indispensable como *interface* visual.

El diagrama se torna indispensable como interface visual y digital: por un lado permite la visualización de las múltiples y estratificadas figuras que median en la creación de una estructura espacial y, por el otro, asentado en una lógica algorítmica, establece un nexo entre la visualización del conocimiento y la interacción con la información siendo capaces de calcular, manipular y presentar en tiempo real cualidades como el movimiento, la transformación o los flujos de información, gracias a la informática.

La obra de arquitectura pensada desde los diagramas se constituye como una obra abierta,

“...capaz de ir integrando datos heterogéneos y de rectificarse a sí misma constantemente” (Montaner, 2008, pp. 197 y 212).

Es el diagrama el que se aboca a la tarea de regenerar continuamente la capacidad de innovar en el diseño.

Tipologías de diagramas

En líneas generales, podemos considerar dos tipologías de diagramas: por una parte, los que sirven para crear y manipular formas y, por otra parte, los que son instrumento de lectura de la realidad, de legibilidad de los fenómenos arquitectónicos, urbanos y territoriales.

Dentro de cada una de estas tipologías podemos encontrar distintas categorías que darán por resultado variadas morfologías. En el primer caso mencionado, se pone el énfasis en los procesos formales partiendo de procesos geométricos, tal como los desarrollos de Colin Rowe continuados por Peter Eisenman.



Fig. 184: Casa Guardiola

Fuente: <https://eduardonavarromartinez.files.wordpress.com/2015/03/captura-de-pantalla-2015-03-10-a-las-00-49-55.png>

Diagramas de la arquitectura compleja

En los diagramas que buscan un registro de la realidad a efectos de la formulación de sus proyectos, la información constituye la estructura en la que se asientan, dando origen a la arquitectura compleja, que generará sus geometrías mediante la morfogénesis.

El diagrama es un primer paso entre la idea y el proyecto, un esquema que no condiciona la forma; un medio geométrico topológico, que puede transformarse y evolucionar.

Siendo que en la arquitectura compleja la configuración espacial se considera un sistema abierto e inclusivo con capacidad de evolucionar, para lo cual se deben incorporar los datos que permitan establecer interrelaciones de variables con una visión holística del proyecto, son los diagramas los que permiten la utilización e incorporación de datos e

información en cada sistema en particular, brindados por la tecnología y formulando una conceptualización para el abordaje del proyecto.

En definitiva, el pensamiento diagramático asociado a sus geometrías, brinda un instrumento polisémico de interpretación, constituyendo la información, la estructura básica de los diagramas de la arquitectura compleja, que se materializará a través de la morfogénesis y sus geometrías.

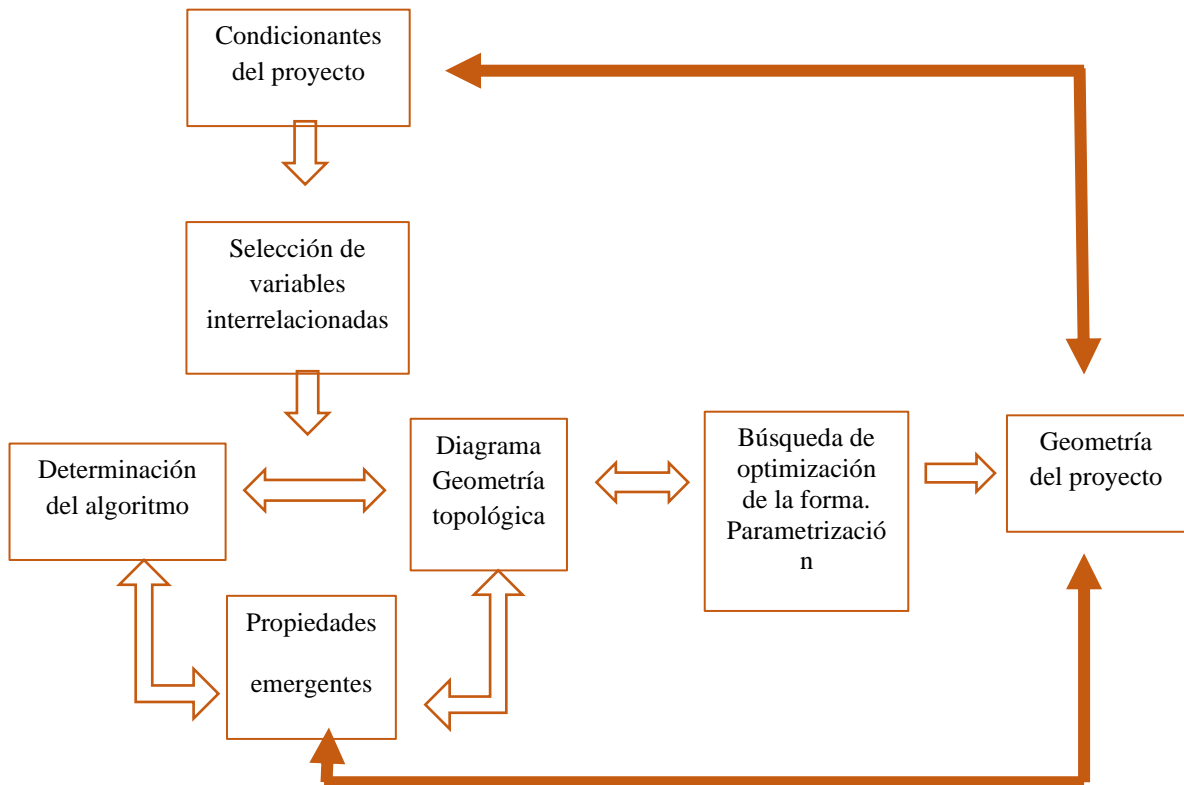


Fig. 185: Esquematización del uso de diagrama como interface informática y visual del proyecto.
Fuente: Elaboración propia.

Al ser la o las personas que proyectan una de las variables que integra el diseño complejo, cada diagrama propone una mirada distinta de los elementos constitutivos de la obra, por lo tanto, su resultado será único, aunque todos los diagramas tienen en común la utilización de los elementos geométricos y los algoritmos informáticos.

A continuación se analizarán algunos diagramas formulados por distintos arquitectos.

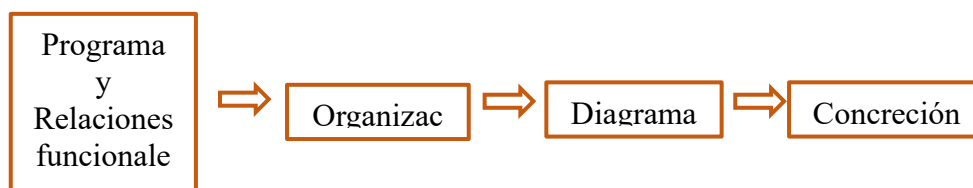
SANAA, ARQUITECTURA DIAGRAMÁTICA

Para Kazuyo Sejima (1956), que trabajó con Toyo Ito (1941) entre 1981 y 1987, los diagramas sirven para relacionar las actividades con los espacios.

El estudio de arquitectura SANAA fundado por Kazuyo Sejima y Ryue Nishizawa (1966) plantea una cierta continuidad con los diagramas estructuralistas del siglo pasado; parte casi exclusivamente de la consideración del programa y las relaciones funcionales de cada proyecto, las cuales se trasladan literalmente del dibujo al espacio arquitectónico y reciben por ello la denominación de diagramas espaciales.

Los diagramas utilizados por Sejima, en realidad constituyen una reinterpretación proyectual generativa de los diagramas matemáticos de Venn. Estos diagramas, también llamados “de burbuja”, incorporan información espacial, donde a cada paquete programático le corresponde una unidad volumétrica.

El siguiente esquema sintetiza la forma de trabajo de SANAA, mediante una reinterpretación de Diagramas Matemáticos de Venn



Centro de Estudios Rolex (2010) – Lausana, Suiza

El *Rolex Learning Center*, fue diseñado en concordancia con la propuesta de uso, consistente en la generación de un laboratorio para la investigación de nuevas formas de estudio e interacción en el siglo XXI.

En su diseño, SANAA traslada literalmente el programa al objeto arquitectónico; de esta forma el edificio se presenta en extremo abstracto, a tal punto que todos aquellos aspectos que no tienen que ver con el programa, como la materialidad o la implantación, están supeditados al refuerzo del programa.

Sin paredes divisorias ni barreras visuales hacia el exterior, se suceden las distintas áreas donde cada una de ellas da paso a la siguiente; sin siquiera escaleras entre niveles, simplemente suaves ondulaciones y terrazas, la gran superficie abarca una única planta, además del estacionamiento cubierto soterrado.

Según Kazuyo Sejima y Ryue Nishizawa, llegaron a la forma final mediante lo que pensaron era la respuesta más adecuada a los requerimientos del programa y las relaciones de las partes entre sí, no despreciando la condición de poder disfrutar del espacio.

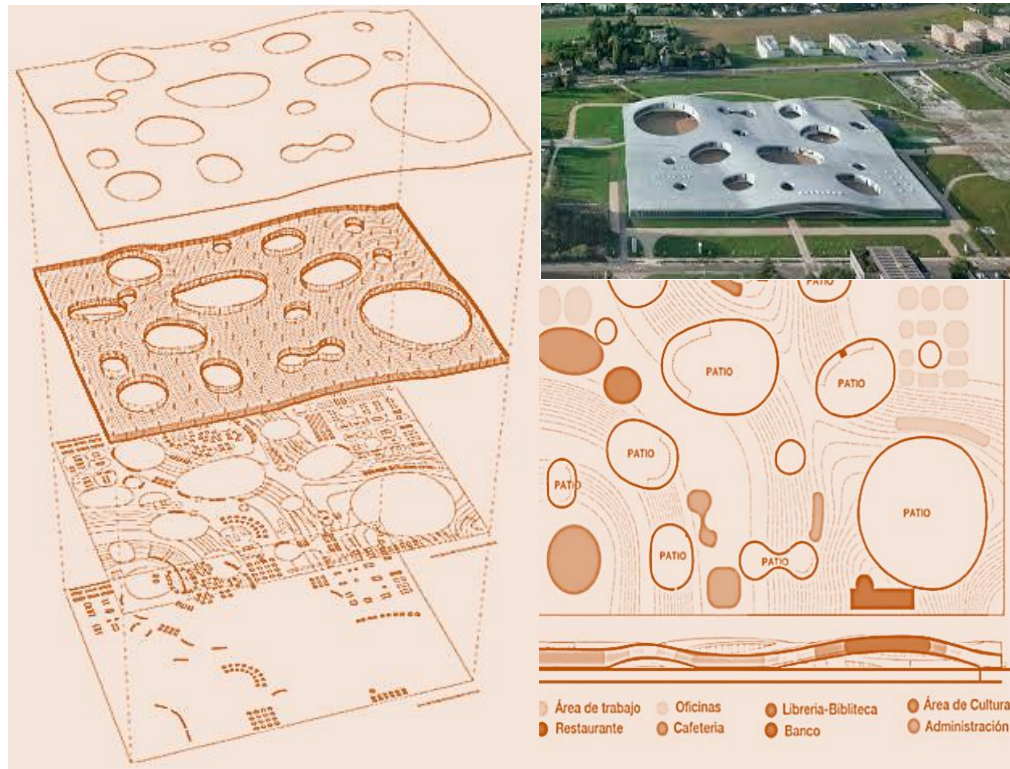


Fig. 186: Diagramas matemáticos de Venn utilizados en la arquitectura de Sanaa
Fuente: <https://ar.pinterest.com/pin/793829871794790126/>

Estructura resistente y configuración espacial

Dentro de la propuesta espacial para el edificio, la cual presenta una sucesión de espacios sin límites materiales interiores ni visuales hacia el exterior, la estructura resistente no podía imponer un límite, simplemente debía integrar la configuración espacial.

Con una superficie que ocupa un rectángulo cuyas medidas por lado son de 121,5m y 166,5 m. respectivamente, la resolución estructural significó un gran desafío para los ingenieros que se ocuparon de ella.

El sótano está cubierto por una losa de hormigón que cumple una doble función: por un lado, sirve como piso del nivel principal, en las esquinas suroeste y noreste del edificio; por el otro, cumple una importante función estructural soportando las cargas horizontales de las cáscaras a través de cables de postensado.

Básicamente, el edificio consiste en dos armazones tridimensionales de hormigón. Dentro de estos dos armazones hay once arcos tensados inferiormente. El armazón más pequeño está apoyado en cuatro arcos, cada uno de 30-40 m. de largo, mientras que el mayor lo está en siete arcos, de 55-95 m., cada uno. Los arcos o bóvedas están fijados por setenta cables pretensados subterráneos.

Para el diseño tridimensional de las curvas de hormigón, el estudio SANAA trabajó conjuntamente con estructuralistas con el software de cálculo estructural SAP 2000, haciendo simulaciones por ordenador para encontrar las formas que generen las menores tensiones de flexión posibles. Después de repetir varias veces el proceso, los ingenieros de Bollinger und Grohmann y Walther Mory Maier llevaron a cabo finalmente los cálculos que resultaron en la forma final.

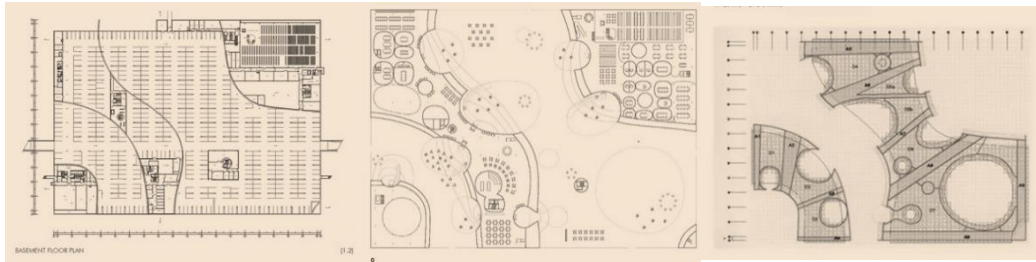


Fig. 187: Unidad espacial, estructural y programática de lo complejo.
Fuente: Intervención propia sobre documentación original.

Las cargas horizontales que debía soportar el hormigón, junto a la variabilidad de la fachada exigió altos niveles de precisión en su ejecución, para lo cual se utilizaron encofrados de madera de 2,5×2,5m. cortados con láser y colocados con tecnología GPS en el sitio.

UN STUDIO. DIAGRAMAS EN RESPUESTA A VARIABLES RELEVANTES DEL PROYECTO

Ben van Berkel (2010) considera que los diagramas son una técnica instrumental, que le brindan la posibilidad de generar diversos modos de trabajar a un nivel organizativo, una técnica diagramática introduce en el proyecto cualidades no verbalizadas, desconectadas de ideales o ideologías, aleatorias, intuitivas, subjetivas y no lineales.

Esta conceptualización que realiza a UN Studio del diagrama, lo lleva a que ante cada proyecto evalúe qué diagramas cumplen de la mejor manera posible las condicionantes que indican las necesidades del proyecto mismo.

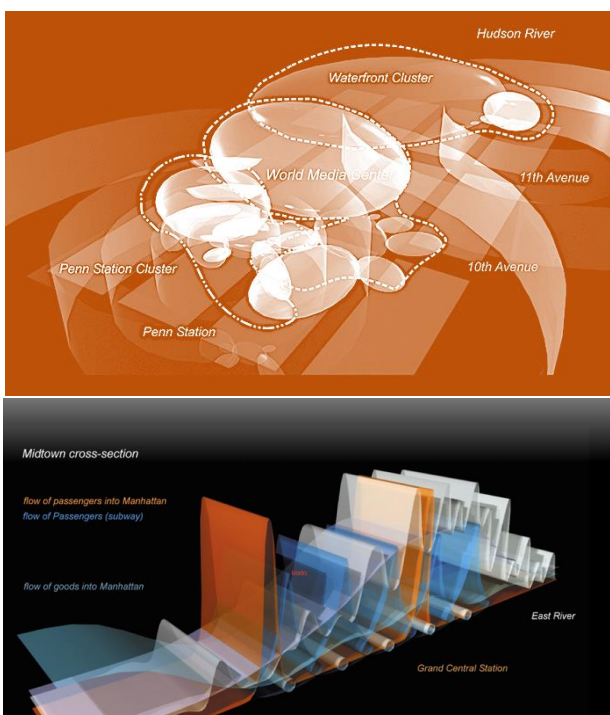
Concurso Manhattan, modelo de ciudad global (1999)

En la investigación realizada por Van Berkel en 1999 del área de Nueva York delimitada por las calles West 23rd y 42nd, para el concurso que tuvo por fin convertir a Manhattan en modelo de ciudad global, partiendo de encuestas y trabajos estadísticos, se generaron diagramas que permitieron visualizar las relaciones entre los flujos de usuarios con el programa, el tiempo y ubicación de los mismos.

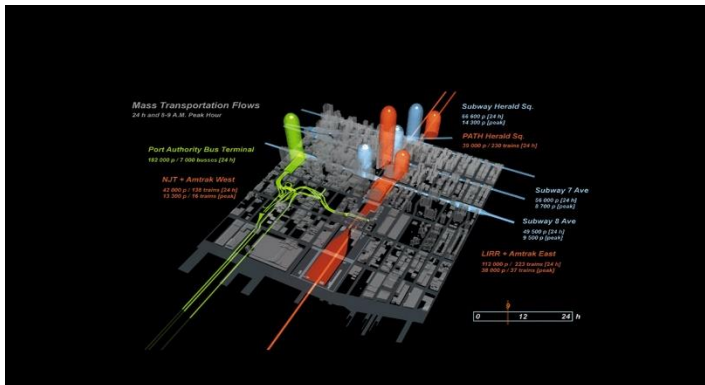
La propuesta para el área fue reubicar las instalaciones y combinarlas en grupos de uso mixto incluyendo todos los parámetros, a efectos de establecer paquetes críticos. Un paquete crítico para la ciudad global es la combinación óptima de factores para que el sitio funcione de manera efectiva con respecto a los programas, la construcción, la economía, la política y la viabilidad.

Mediante amplias encuestas formularon diagramas a efectos de visualizar las relaciones entre flujos de usuarios existentes, tiempo y ubicación, con el programa. Mediante los diagramas se mapea la actividad de Manhattan a efectos de establecer parámetros de incidencia en el proyecto.

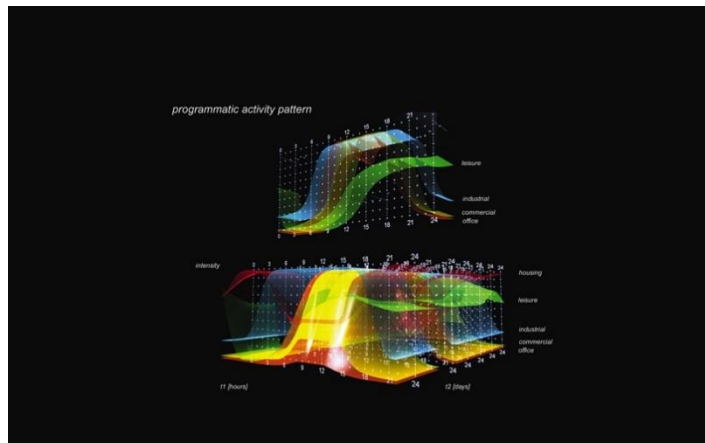
Las figuras que se muestran a continuación, corresponden a los diagramas originales correspondientes al patrón de actividades programáticas y flujo de transporte masivo. (Fuente: sitio web oficial de *UN Studio*)



Implantación - Relaciones urbanas



Sección transversal del centro de la ciudad. Flujo de pasajeros y mercancías.



Flujo de pasajeros a Manhattan.
Flujo de pasajeros del metro.

Fig. 188: Determinación de diagramas mediante la expresión geométrica de las estadísticas. Fuente: <https://www.unstudio.com/en/page/12062/ifcca>.

Museo Mercedes Benz. Stuttgart, Alemania. (“2006)

En la memoria del proyecto se expresa:

“Queríamos construir una idea clara: la idea de movimiento: la razón de ser del automóvil, como tema central para el nuevo museo de Mercedes Benz en Stuttgart”... Concebimos un trozo de autopista elevada con traza helicoidal. Intentamos así, para el nuevo museo de Mercedes Benz construir una imagen capaz de sorprender y fascinar. Capaz de permanecer en el tiempo y en la memoria”. (Campo Baeza, 2002, s/p).

La idea de generar una autopista, presentaba además, una restricción inamovible incluida en la generación de los diagramas del Museo Mercedes Benz: convertir al edificio en ícono de la ciudad de Stuttgart, lo que implicaba: desde lo urbanístico, lograr que el Museo se convierta en un elemento identitario de la ciudad. Esta restricción implicó determinadas variables:

Fueron variables tenidas en cuenta para el proyecto: emplear alta tecnología constructiva y estructural que se pudiese remitir a tecnología utilizada por la empresa en la generación de sus productos; implementar una nueva noción de museo y desde la construcción misma, lograr el asombro mediante un elemento arquitectónico identitario de la ciudad.

El desarrollo de complejas geometrías derivó en una planta simétrica de tres hojas mientras que espacialmente, evoca el espiral del ADN.

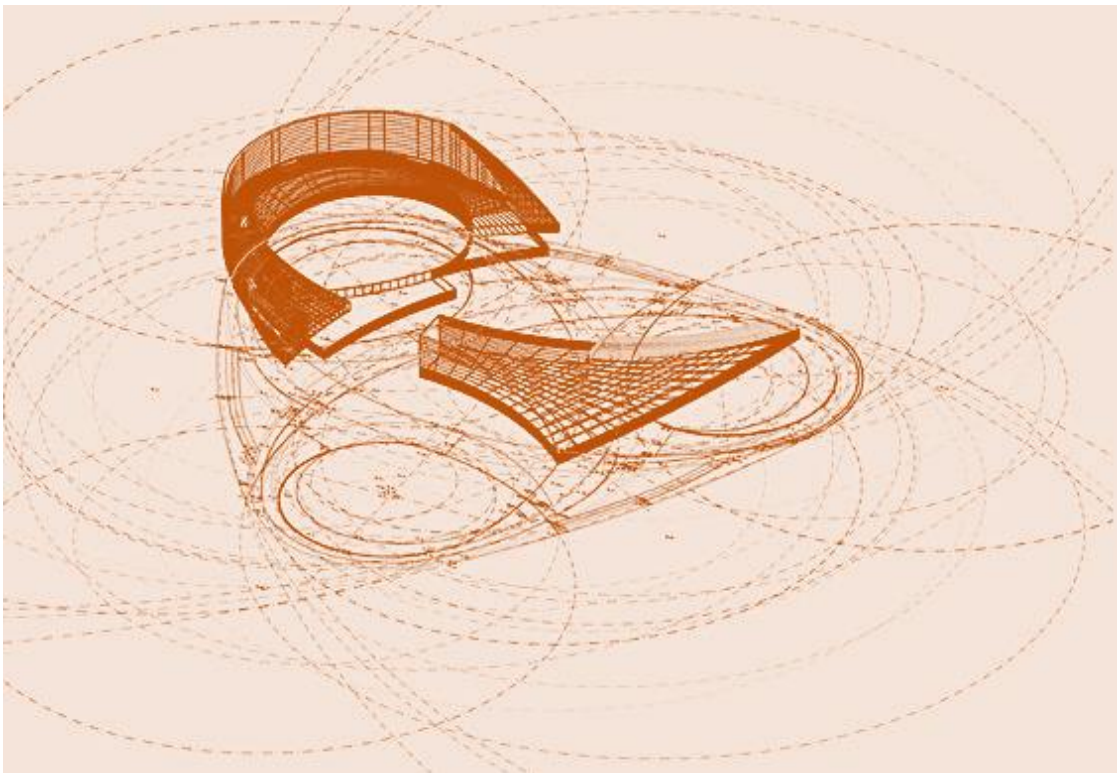
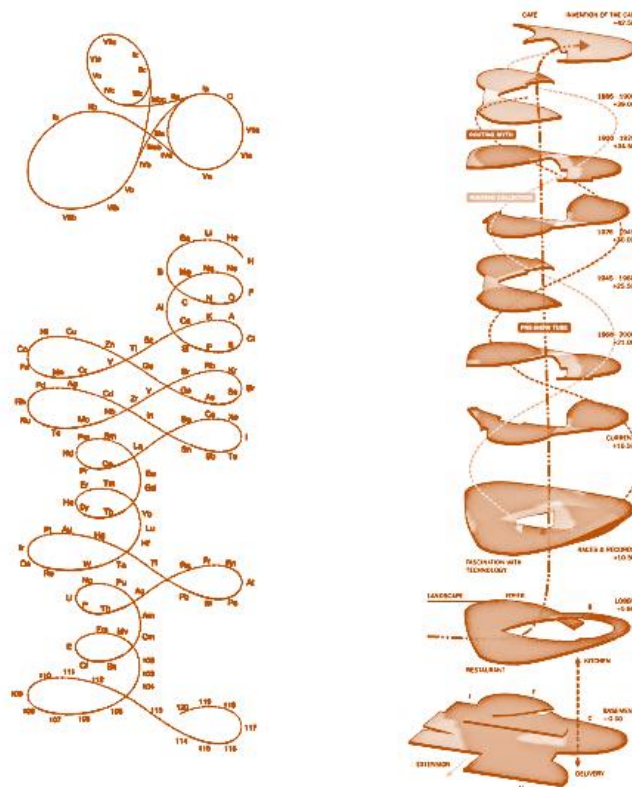
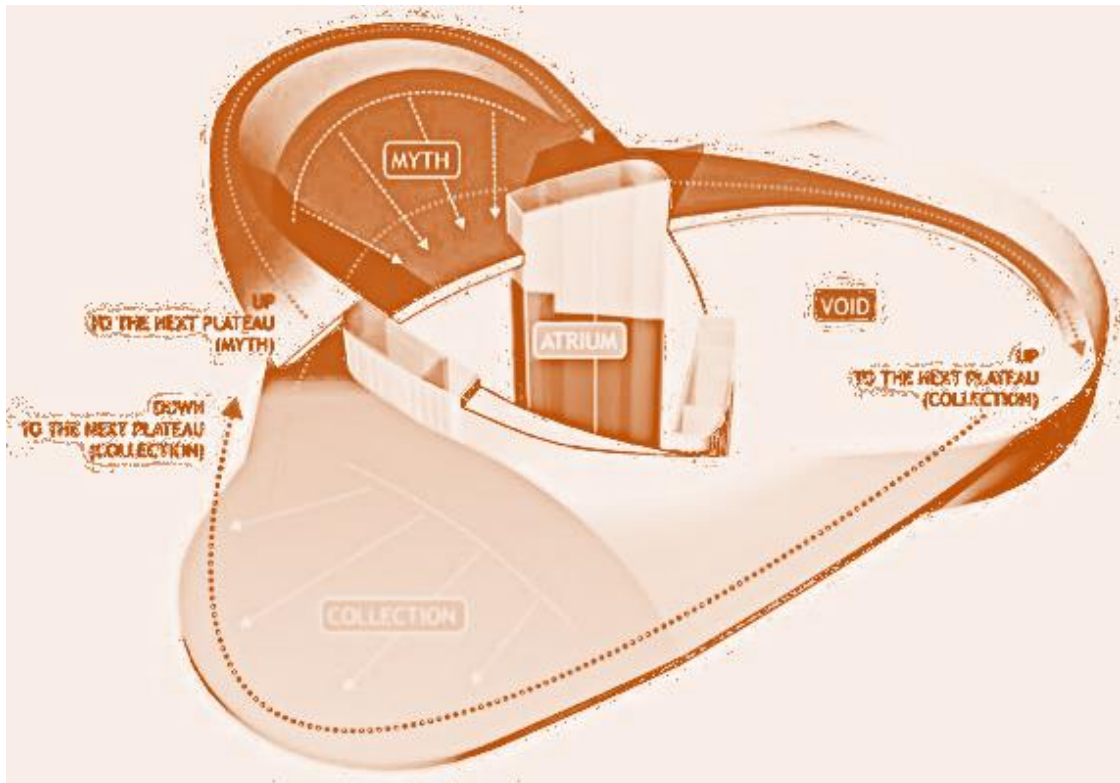


Fig. 189: Geometría de posición en la generación del museo Mercedes Benz

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/867041/museo-mercedes-benz-unstudio/58ae3cdbe58ece2b45000267-mercedes-benz-museum-unstudio-position-diagram>

La metáfora alude a la herencia de la marca Mercedes-Benz, mientras que constructivamente la forma en planta de trébol es la proyección de la espiral que se forma con dos rampas entrelazadas de ochenta metros de longitud, sin escalones, y que sirven como caminos principales para que se desplace el público, haciendo referencia al Guggenheim proyectado por Wright y al Pompidou proyectado por Piano



.Fig. 190: Diagramas circulatorios y compositivos del Museo Mercedes Benz La geometría aún lo simbólico con lo constructivo partiendo del diagrama.
 Fuente: Sitio oficial del estudio. <https://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>

El interior del edificio plantea dos recorridos, llamados “Mitos” y “Colecciones”, siendo ambos independientes pero interrelacionados, permitiendo el pasaje, en cualquier momento, de uno al otro.

“Mitos” es un recorrido cronológico a lo largo de la historia del automóvil, desde su invención hasta la actualidad. Las siete salas en las que se desarrolla están unidas por medio de una rampa de 80 metros de longitud. La rampa, alternada con secciones planas, permite la accesibilidad a las salas.

El segundo recorrido, a diferencia del primero, ordena cronológicamente, las “Colecciones”: estando clasificadas por el tipo de utilización de los vehículos.

Los dos recorridos desembocan en la sección “Carreras y récords”: una amplia curva peraltada que ocupa prácticamente la totalidad de la sala termina en una pared vertical de planta cilíndrica, en la que están suspendidos vehículos legendarios que ostentaron récord de velocidad.



Fig. 191: Respuesta estructural al diagrama de la configuración espacial
Fuente: <https://circuitocoches.com/2011/04/15/visita-al-museo-mercedes-benz-en-stuttgart/>

Materializar la compleja geometría del museo supuso el empleo de las más altas tecnologías, con base en un modelo de datos tridimensional, actualizado cincuenta veces durante la fase de construcción y con la realización de 35.000 planos de obra.

Para *UN Studio*, la demanda geométrica sólo podía ser satisfecha con las propiedades del hormigón armado, constituyendo además un telón de fondo ideal para las exposiciones. La continuidad circulatoria del interior también es parte del principio estructural de la fachada.

La construcción de la estructura en forma de hoja de trébol lleva a puntos donde el techo se torna muro y simultáneamente cierra una esquina, conectando directamente con el siguiente espacio expositivo.

Entre las particularidades del museo cabe destacar los techos sin pilares que cubren las salas de 33 metros de ancho y pueden soportar el peso de diez camiones, al igual que los elementos portantes de curvatura doble: los llamados “twists”, que recuerdan a una hélice de enormes dimensiones.



Fig. 192: Estructura de cubierta y diagrama de fachadas.

Fuente: Sitio oficial del estudio. <https://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>

Rorengin Office Architects (foa): Relaciones entre herramientas virtuales y componentes de materialización

En la obra de Alejandro Zaera-Polo y Farshid Moussavi encontramos distintos planteos de diagramas, en función de un desarrollo proyectual que responde en forma dinámica a las necesidades del hecho arquitectónico.

Uno de ellos lo constituye su serie de “phyla” o genealogía filogenética (Figura 144: Prototipos diagramáticos), que mediante siete categorías (función, factibilidad, equilibrio, discontinuidad, orientación, geometría y diversificación), conforma un léxico proyectual.

Estas categorías pueden “proliferar, mutar y evolucionar” empleándolas en otros proyectos.

La serie de diagrama genealogía filogenética, se basa en la Teoría Matemática de Grafos en base a la cual se desarrolla la Teoría de las Redes que a partir de 2003 será la gran protagonista de la ciencia.

Otro ejemplo de la utilización de diagramas por parte de FOA, ya se analizó en esta tesis al desarrollar la Terminal Portuaria de Yokohama en la que mediante diagramas circulatorios y estructurales se define el proyecto.

OMA: REM KOOLHAAS. TOMA DE DECISIONES Y PLANIFICACIÓN

En Rem Koolhaas encontramos una diagramática organizativa dirigida a la toma de decisiones. Mediante esta estrategia intenta descubrir la estructura intrínseca del proyecto a efectos de manipularla.

Sus diagramas condensan la información de modo pragmático, generando un proceso de proyecto abierto a las influencias de las variables externas; la visualización de los datos le sirve como punto de partida para sucesivas interpretaciones. Koolhaas trabaja su diagramática con criterios de análisis y planificación, al modo empresarial.

Uno de los ejemplos de este tipo de diagramas lo encontramos en los realizados para el diseño del Anillo Urbano de Yokohama, el cual conceptualiza las intensidades de uso de los distintos espacios durante las 24 horas del día, inclusive superponiendo los distintos usos de un mismo espacio en distintas horas. Esta forma de trabajo posibilita el trazado de conexiones y fusiones programáticas.

La figura muestra la visualización de datos cuantificados estadísticamente, mediante formas geométricas en una trama cartesiana.

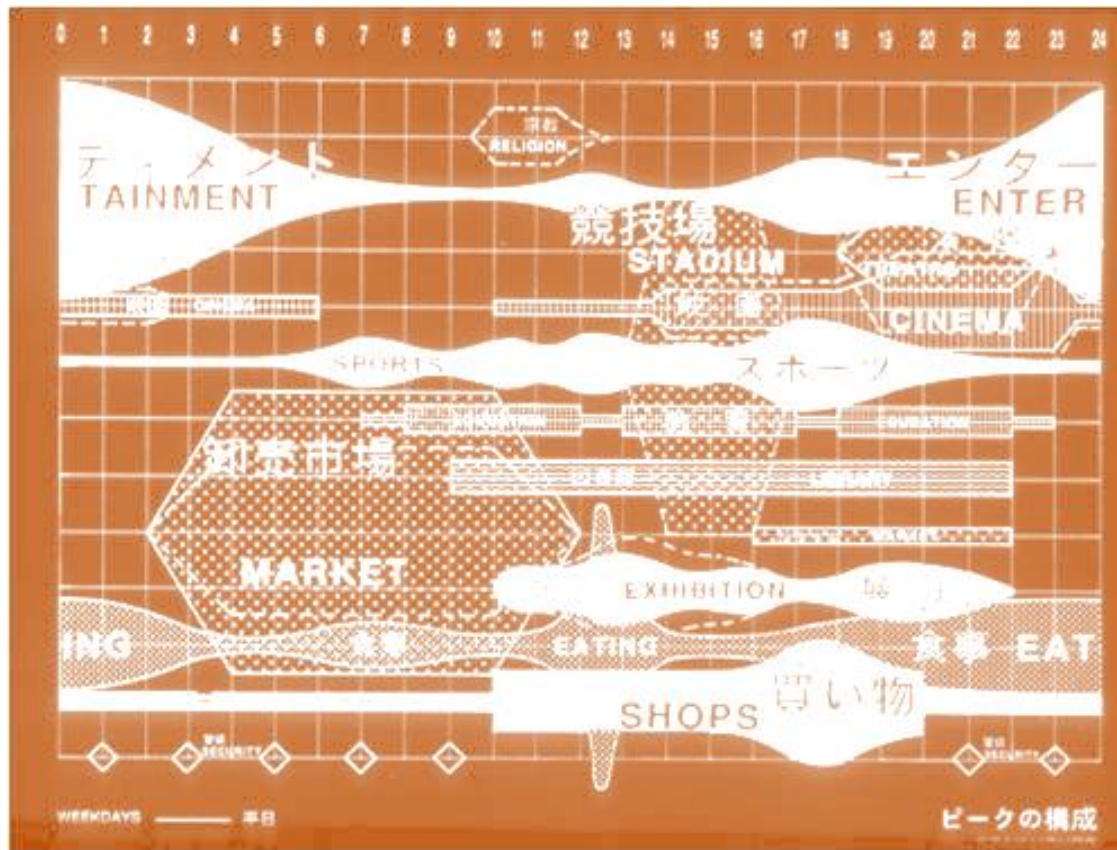


Fig. 193: Diagrama para el estudio del Anillo Urbano de Yokohama

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-19-Programmatic-Lava-Yokohama-Rem-Koolhaas-Diagrama-programatico-Fonte_fig16_251076550

Otra de las formas de trabajo de OMA, la constituyen las maquetas que en forma de diagramas tridimensionales desempeñan un papel decisivo en el trazado del proyecto, generando modelos conceptuales que organizan y estructuran la información: “(...) modelos conceptuales son preparados a partir de las ideas utilizables, muchas veces estos modelos representan una traducción directa de un diagrama en la tercera dimensión (...) Las formas ocasionalmente resultan de la traducción de un diagrama en un modelo conceptual”. (Oswalt & Hollwich, 1998, p. 7).

Biblioteca de Seattle (1999- 2004)

En el diseño de la biblioteca se utilizó por primera vez la tipología de diagramas conocida como “*datablock*”, compuesto por apilamiento de bloques por el cual se relacionan las distintas funciones con la cantidad, cuantificación y cualificación de espacios, funciones tecnológicas y servicios, a efectos de manejar la información obtenida estadísticamente. El esquema así obtenido se relacionó con los metros cúbicos asignados a cada ítems, reorganizando espacios y funciones de cada nivel.

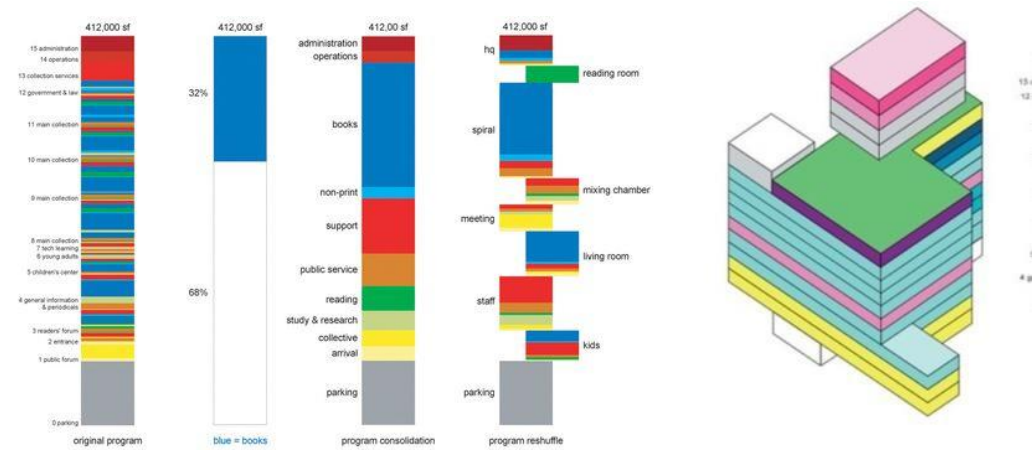


Fig. 194: Datablock: Reorganización funcional, espacial y programática de la Biblioteca de Seattle. Archivo OMA

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623933/biblioteca-central-de-seattle-oma-lmn/5721910fe58ece9438000003-seattle-central-library-oma-lmn-diagram-platforms-2>



Fig. 195-A Biblioteca de Seattle. Distribución de espacios y maqueta. Archivo OMA
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Rem-Koolhaas-Biblioteca-Publica-de-Seattle-1999_fig4_316598318

Otra variable interviniente en la formulación de los diagramas fue el manejo de la luz para su aprovechamiento la mayor cantidad de horas posibles, en los espacios que así lo requerían.



Fig. 195-B Diagrama de aprovechamiento lumínico. Iluminación, espacialidad, estructura.
Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/biblioteca-central-de-seattle>

Koolhaas, en este proyecto, reformuló el concepto de biblioteca, entendiéndola como lugar de acceso a la información en todos los soportes disponibles en la actualidad, ofreciendo espacios flexibles con la previsión de ampliaciones a futuro y futuros medios de información e interacción social.

La biblioteca se compone de plantas genéricas en las que se puede desarrollar casi cualquier actividad.

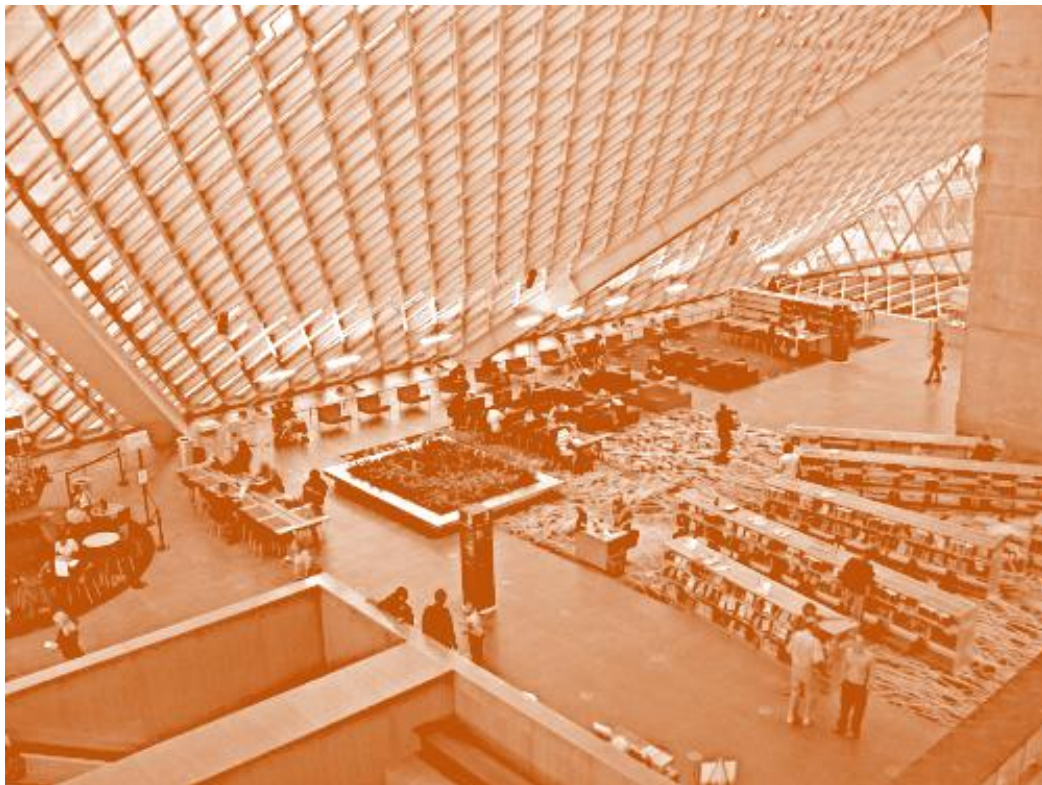


Fig. 196: Interior Biblioteca de Seattle

Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/biblioteca-de-seattle/>

Desde el exterior se visualizan 5 bloques colocados uno encima del otro respondiendo, cada uno de ellos, a las necesidades programáticas que se organizaron en cinco plataformas independientes, conectadas y apiladas verticalmente, limitadas por una piel de acero y cristal que permiten la optimización lumínica y las vistas hacia el exterior.

Es una respuesta estructural al diagrama de la configuración espacial: Una estructura en espiral ofrece una superficie continua que se eleva cuatro plantas por lo cual se ha dotado al edificio de un sistema de rampas en zigzag accesibles a todas las edades y necesidades, apoyadas en delgadas columnas.



Fig. 195: Piel y estructura de la Biblioteca de Seattle
Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/biblioteca-de-seattle/>

El planteo espacial requería utilizar el menor número posible de columnas, a efectos de generar un edificio que pareciera flotar. A este condicionante estructural se debe agregar que la biblioteca se encuentra en una zona sísmica.

En el paper realizado por Alheli Martínez “Biblioteca de Seattle: “Prefiguración y configuración”, en el apartado referido a la solución estructural de la biblioteca, realiza la siguiente descripción:

“La solución de la empresa MKS Ingeniería, en colaboración con Arup, fue la de utilizar dos sistemas estructurales distintos en capas, con un bloque central de hormigón que proporcionase rigidez.”.

Una de las capas está compuesta por cerchas alrededor de las plataformas, que soportan las cargas de gravedad del edificio y se apoyan en columnas inclinadas.

Un segundo sistema, el exoesqueleto del edificio, lo constituye una trama romboidal de acero que conecta las cerchas que rodean a las plataformas y actúa como acabado arquitectónico de interiores.



Fig. 196: Exoesqueleto de la Biblioteca
Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/biblioteca-de-seattle/>

Este sistema estructural se completó con refuerzos en las áreas que así lo requerían.

La rejilla de acero se reforzó en los lugares en que los cálculos mostraban menor incidencia de esfuerzos; en las columnas con escasa inserción de ángulos transversales y por último se colocaron columnas inclinadas coincidentes con la inclinación de la cuadrícula sísmica.

MVRDV: Winy Maas, Jacob Van Rijs y Nathalie De Vries. *Datascapes* (Paisaje dde datos)

A través de la búsqueda de información, el grupo holandés MVRDV, trata de interpretar los múltiples factores intervinientes en cada proyecto, a efectos de responder a la complejidad de la sociedad actual, obteniendo multiplicidad de posibilidades. Mediante el empleo de herramientas digitales plantean sus “*datascapes*” que permiten establecer las necesidades y demandas que se plasmarán en la respuesta formal.

Para el grupo, la complejidad del momento actual, sólo puede abordarse desde la multiplicidad de opciones y su diversificación, posibilitadas ambas, por el manejo de la información.

Winy Maas (1996), en su texto “*Datascape*”, advierte que no se trata de un paisajismo inocente dotado de un moralismo simplista, sino de un modo de pensar la multiplicidad y el pluralismo.

Bloque residencial Silodam de Ámsterdam

El encargo para el proyecto del bloque residencial Silodam de Ámsterdam le supuso al grupo enfrentarse a un nutrido paquete programático constituido por diversidad de funciones e intereses de un amplio espectro de comitentes.

Funcionalmente debían interactuar, entre otros, espacios públicos, áreas de recreación, de trabajo comerciales con distintas tipologías de vivienda.

Financiera y económicamente, debían dar respuesta satisfactoria a los inversionistas intervinientes en el proyecto: la alcaldía de la ciudad, una corporación semipública, una promotora de viviendas y una desarrolladora de oficinas.



FIG. 197: BLOQUE RESIDENCIAL DE SILODAM. ÁMSTERDAM
fuente <https://arquitecturaviva.com/obras/viviendas-silodam>

Las decisiones proyectuales fueron justificadas y explicadas mediante el uso de diagrama ante los distintos actores decisorios.

Las tres variables del volumen total (alto, ancho y largo), se determinaron en función de las normativas vigentes; mientras que en el ancho se sumaron las condiciones de asoleamiento y las proporciones de las edificaciones cercanas.

A efectos de organizar las tipologías de viviendas se utilizó un diagrama en el cual, el volumen del bloque, en un principio concebido como rectangular en el que se disponían

las distintas tipologías de viviendas, fue cambiando en la medida que se implementaba nueva información, hasta llegar a la forma final.

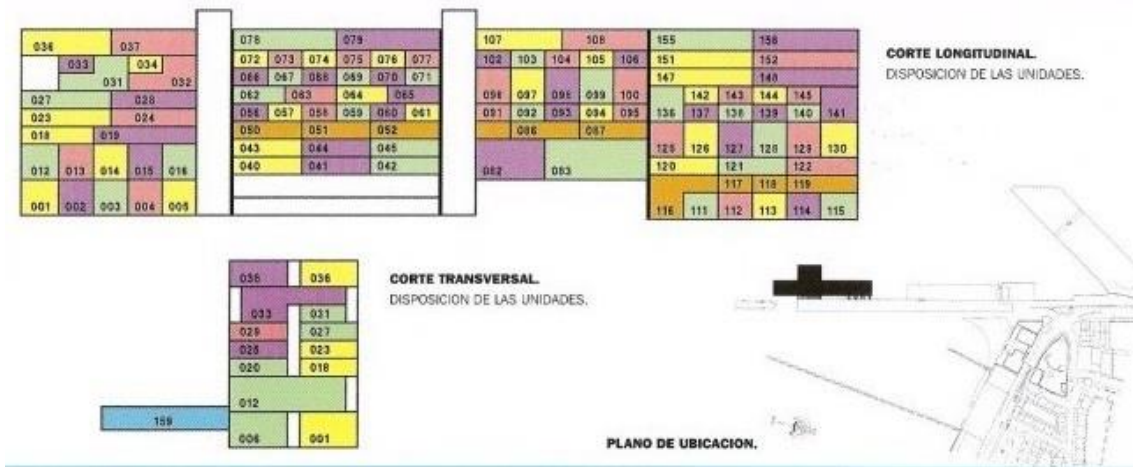


Fig.198: Disposición de tipologías MVRDV 1999
 Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/silodam/>

A su vez, mediante un grupo de diagramas llamados “negociaciones políticas” se determinó que la mejor forma de distribuir esas tipologías para promover la democracia, la inclusión y la seguridad, era mezclándolas.

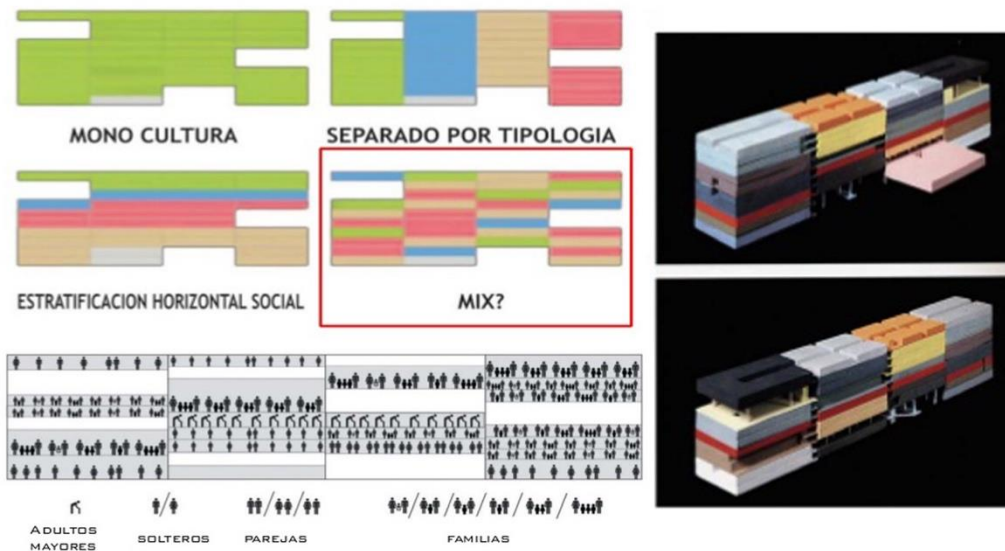
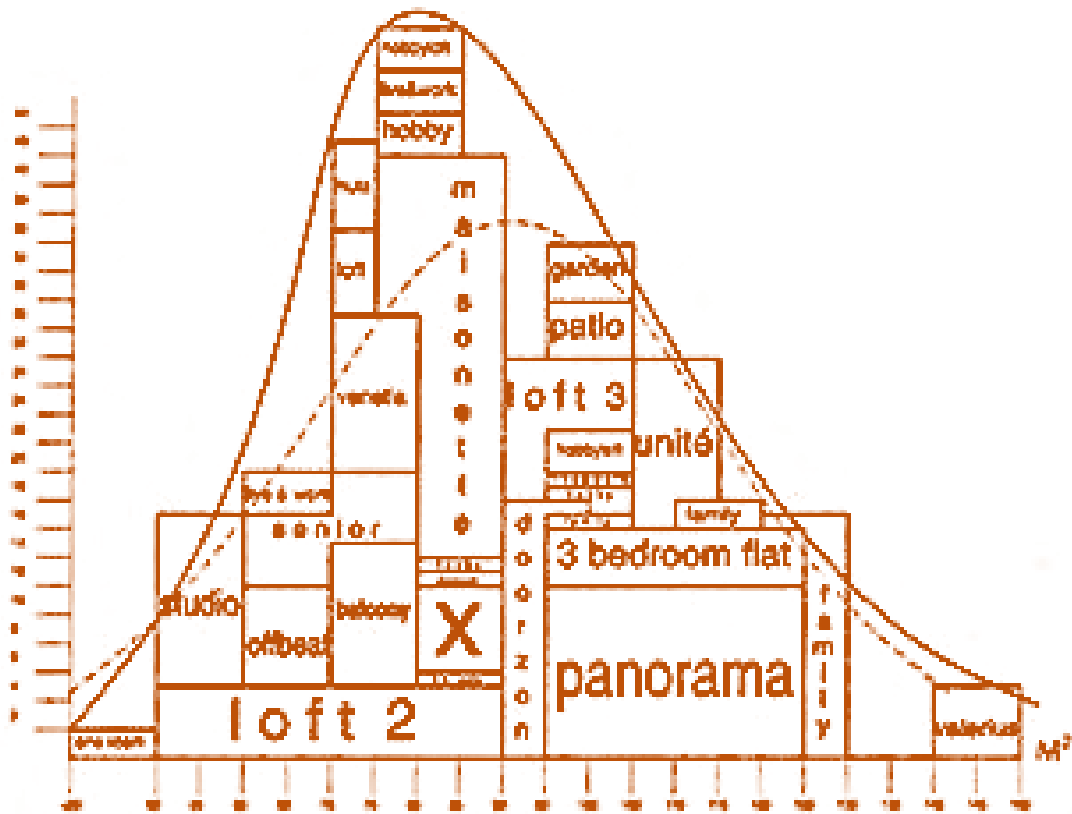


Fig. 199: Diagrama de negociaciones. MVRDV 1999.
 Fuente: <https://www.slideshare.net/DIEGUISIMUS/presentacion-final-silodam/4>

Para determinar las tipologías, el área total ocupada por cada tipología y la cantidad de unidades de cada una de ellas, MVRDV realizó una investigación referida a las distintas formas de habitar en Ámsterdam, relacionándolas estadísticamente, con requerimientos de posibles compradores; obtuvieron veinticinco formas distintas de organización.

Mediante una curva de Gauss se determinó el área y el número de repeticiones de las unidades de cada tipología a efectos de lograr la rentabilidad del emprendimiento.



LOFTS	HUTS	PATIO	MAISONETTE
GYMNASIUM	HOBBY	X-HOUSE	OFF BEAT 3 ROOM
PANORAMA	UNITE	BALCONY	PANORAMA
PANORAMA		SENIOR	GARDEN HOUSE
HOBBY	SENIOR	LIVE & WORK	DOORZON
VALERIUS HOUSE	STUDIOS	WORK LOFT	3 BEDROOM FLAT
VENETIAN WINDOW	HALL & TRAY	MARINA	FAMILY HOUSE
	STORAGE		LIVE & WORK LOFT

Fig. 200: Diagrama de curva de Gauss y resultado final de las negociaciones económicas. MVRDV. 1999.

Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/viviendas-silodam>

El proceso de diseño realizado en Silodam, es una muestra clara de las implicancias del diagrama de datos. El proceso de diseño aquí explicado es, quizás, la muestra más representativa de la implementación del diagrama de datos basado en la investigación y el empleo geométrico y estadístico de los mismos. “Todo explicado, nada inventado, nada arbitrario”. (Allen, 1997, p. 27).

DISEÑO PARAMÉTRICO

El diseño paramétrico se basa en la generación de un árbol de relaciones geométrico-matemáticas, partiendo de una familia de parámetros iniciales, con el fin de brindar la totalidad de soluciones posibles, según el dominio de definición de las funciones intervinientes. Es decir, no se basa en métricas cuantitativas, sino en relaciones de variables del proyecto; permitiendo generar geometrías a partir de la definición de una familia de parámetros iniciales y la aplicación de técnicas informáticas algorítmicas.

Una consecuencia inmediata de lo antedicho es que, en términos de Lynn, el proyecto se escapa de rígidas geometrías euclídeas para trabajar con curvas *splines* y *nurbs*³⁴; curvas dinámicas definidas por un punto que se mueve en el plano o el espacio en un tiempo determinado, posibilitando la animación.

Esta afirmación de Lynn, tiene su correlato matemático al definir a la línea como un punto desplazándose en un tiempo determinado, en vez de considerarla como una sucesión infinita de puntos.

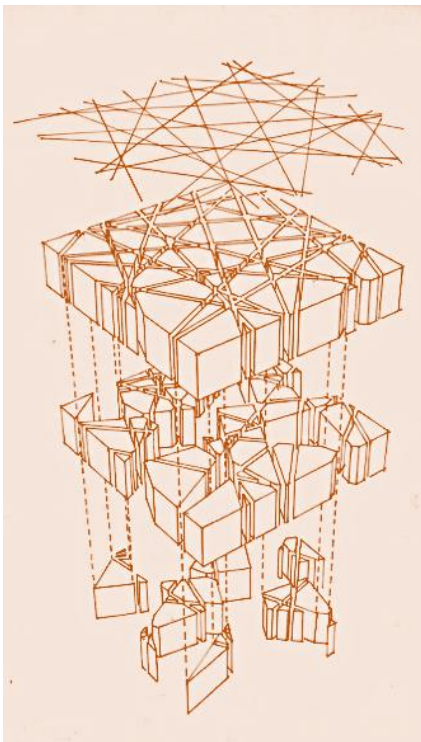
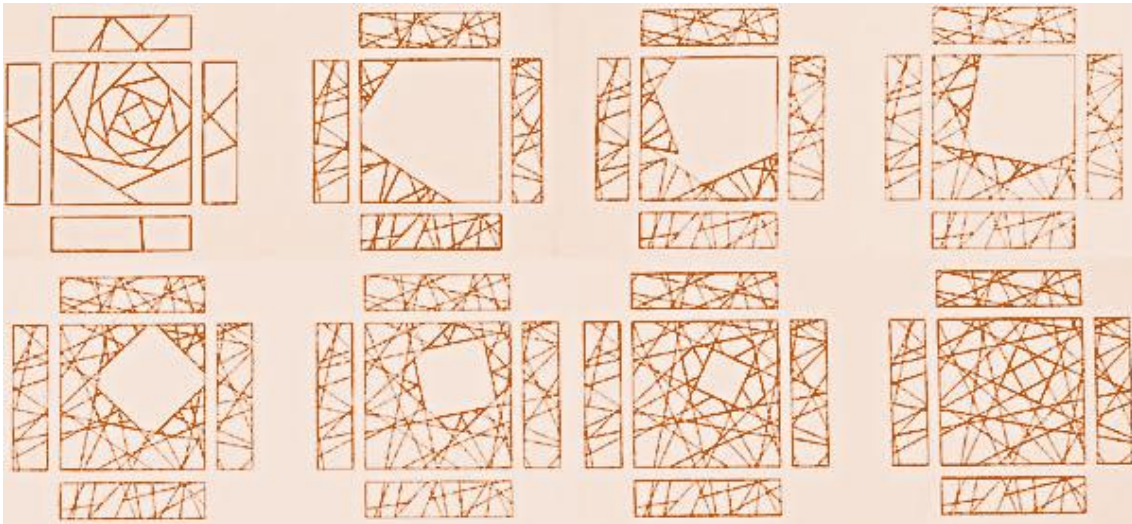
Esta estrategia “considera desde la aplicación de curvas paramétricas hasta la relación de propiedades generales de la edificación y utiliza programación gráfica y/o *software* de análisis. En general, el diseño paramétrico se refiere a la vinculación entre aspectos formales del proyecto, que se pueden modificar durante su desarrollo” (Woodbury, 2010, p. 11).

Una muestra de ello lo constituyen las obras del ingeniero estructuralista Cecil Balmond (1943) que en base a esquemas geométrico-matemáticos, y trabajando en forma conjunta con los autores del proyecto, resuelve el sistema estructural, conservando la configuración espacial.

En el *Serpentine Gallery Pavilion*, 2002, si bien recurre a un sistema generativo para formular su lenguaje formal, éste se corresponde con la respuesta a un sistema estructural que responde a la configuración espacial, dadas las variables que en ella se interconectan.

Fig. 201: Serpentine Gallery Pavilion 2002 / Toyo Ito + Cecil Balmond + Arup

³⁴ Ver apartado “Geometrías utilizadas en la configuración espacial de la Arquitectura Compleja”.



Fuentes:
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-244430/serpentine-gallery-pavilion-2002-toyo-ito-cecil-balmond-arup>
<http://diyarchitecture.selbermachendeko.com/throughout-toyo-itos-writings-the-relevance-of-itos-pavilion-relevan/>

La definición de correspondencias entre variables debe conformar un sistema de relaciones geométricas que puedan ser reconocidas por una plataforma de programación gráfica.

Al respecto Alexandra Molinare afirma que el diseño paramétrico es la abstracción de una idea o concepto, relacionado con los procesos geométricos y matemáticos, que nos permiten manipular con mayor precisión nuestro diseño para llegar a resultados óptimos. (Molinare, 2022).

En el siguiente gráfico se esquematiza el concepto de diseño paramétrico.

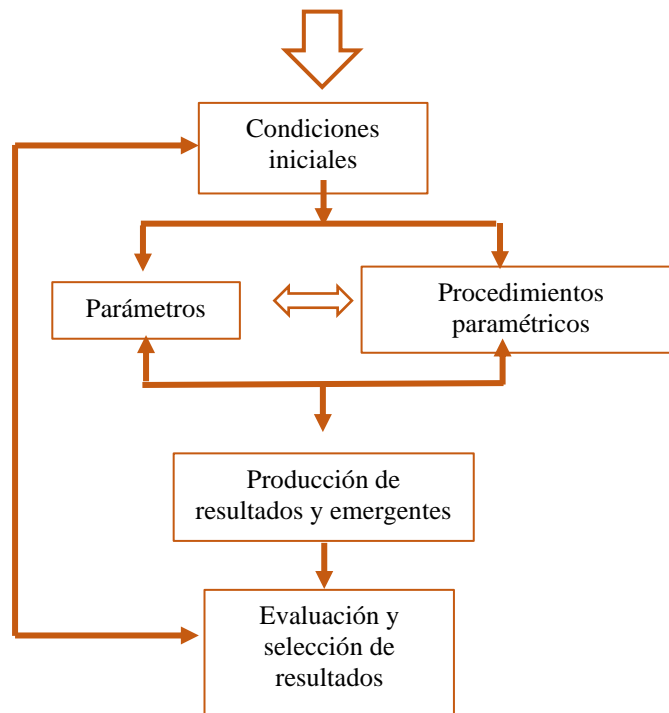


Figura 202: Proceso de diseño paramétrico
Fuente: Elaboración propia

La aplicación del diseño paramétrico no constituye un simple mecanismo de búsqueda formal, sino que permite la optimización de la forma en relación a determinadas variables, pudiendo ser estos:

- Ambientales, tales como datos geográficos, climáticos, restricciones normativas de situación urbana, materialidad, flujos peatonales, vehiculares, presencia de singularidades, referencias, etc.
- Los parámetros globales: consideran dimensiones o proporciones generales con rangos mínimos y máximos, requerimientos funcionales (ergonomía, accesibilidad y confort), condiciones formales, restricciones técnicas constructivas y estructurales, etc.
- Los parámetros de ejecución consideran desde el tiempo y lugar de acopio de materiales hasta costos y mano de obra en tiempo real.
- Dimensiones de producción: tamaño de materiales y máquinas de ejecución.
- Propiedades materiales: rangos de resistencia o flexión.

- Características del producto: color, textura, terminación, etc.
- Valores de aplicación: costos del proyecto.
- Dimensiones para transporte: magnitudes de vehículos y operación.

Entre los parámetros locales podemos considerar los que indican interacción con otros componentes, como ser condiciones de borde y respuesta a configuraciones adyacentes, requerimientos de montaje: tipos de ensamblaje, unión y dilatación entre componentes, etc.

Algunos de los Programas Geométricos utilizados para la definición de procedimientos que manipulan formas, son el *Grasshopper* en *Rhino*, *Generative Components* en *MicroStation*, *Digital Project* en *CATIA*; existiendo también programas de optimización topológica, para cálculo resistente por análisis de elemento finito con restricciones de material o comportamiento; mientras que, los programas de simulación ambiental son utilizados para el cálculo de consumo energético de edificaciones, iluminación solar, radiación o ventilación.

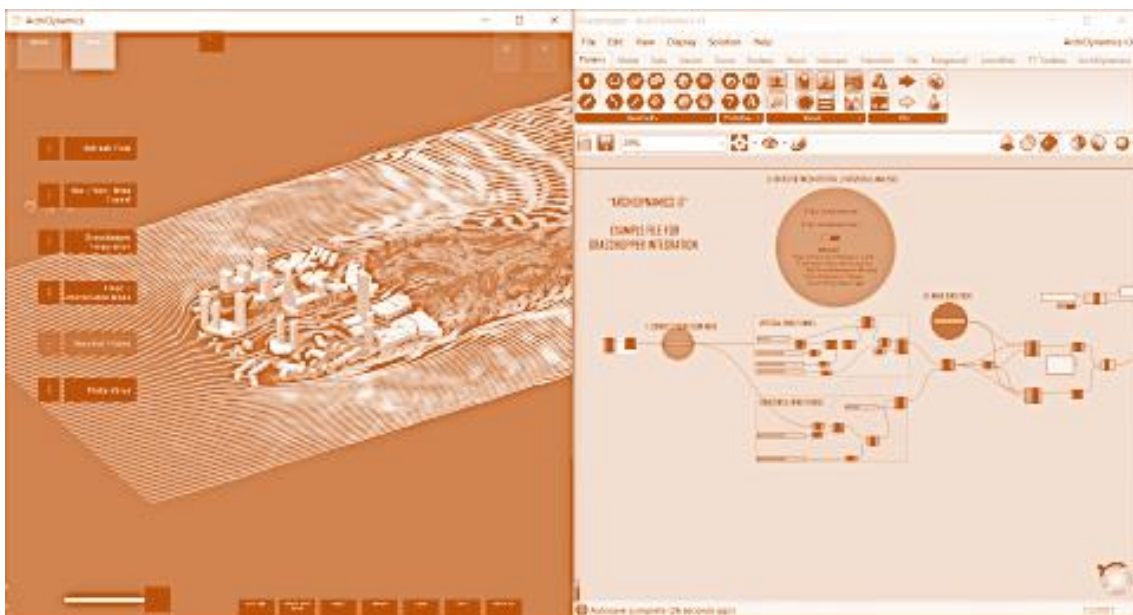


Fig. 203: ArchiDynamics Plugin for Grasshopper. Análisis y simulación, Arquitectura, Diseño medioambiental

Fuente: <https://www.food4rhino.com/en/app/archidynamics-plugin-grasshopper>

La figura muestra la de materialización de geometría compleja generada por algoritmos del diseño paramétrico, mediante fabricación digital.



Fig. 204: Geometrías complejas prototípicas de THEVERYMANY – SEED studio, obtenida mediante el empleo de la parametrización de las funciones intervinientes y su variabilidad,

Fuente: <https://www.studioseed.net/blog/software-blog/parametric-generative-design-blog/python-software-poo/las-arquitecturas-prototipicas-de-theverymany/>

El desarrollo del diseño paramétrico sólo es posible por la aplicación de algoritmos que se analizarán a continuación.

ALGORITMOS

La Real Academia Española explicita dos acepciones del término algoritmo:

“Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema; método y notación en las distintas formas del cálculo.”³⁵

Tanto el diseño paramétrico como la informática en general, se basan en la utilización de algoritmos que permiten la inclusión de múltiples variables obteniendo un amplio abanico de posibles soluciones, mediante una serie ordenada de reglas a seguir en búsqueda de un fin determinado.

Formalmente:

“Un algoritmo es un conjunto finito de pasos definidos, estructurados en el tiempo y formulados con base en un conjunto finito de reglas no ambiguas, que proveen un procedimiento para dar la solución o indicar la falta de esta a un problema en un tiempo determinado.” (Rodríguez, 2015, p. 3).

³⁵ Real Academia Española: <https://dle.rae.es/algoritmo>

Para Cecil Balmond, un algoritmo es una regla geométrica o aritmética que se repite. (2002)

Si buscamos un ejemplo conocido y elemental de algoritmo, lo encontramos en la resolución de la división de un número en determinadas partes; el método tradicional de la división, aprendido en la escuela primaria, es un algoritmo al igual que el utilizado para hallar la raíz cuadrada de un escalar o la multiplicación por un número de más de una cifra.

Desde el punto de vista de la informática:

“(…) en su forma más simple, un algoritmo es el proceso secuencial sistemático por el que símbolos o números de entrada (input) son convertidos en símbolos o números de salida (output), en un número finito de pasos. La formulación precisa y genérica del concepto de algoritmo es del siglo XX, y su especificación más importante es en los términos de una máquina de Turing”. (Strohman, 1995, p. 273)³⁶.

Interpretando desde las matemáticas, el concepto expresado por Strohman, se puede decir que los símbolos o números de entrada constituyen el dominio de una función, mientras que los de salida son los elementos del conjunto imagen de dicha función que debe ser biyectiva pues no acepta dos respuestas distintas. Desde este punto de vista, todo algoritmo puede ser una composición de funciones.

Existe una gran cantidad de algoritmos para realizar diferentes tareas; a efectos de resolver problemas complejos de matemáticas, manipular geometría, hacer búsquedas por internet, reconocer patrones, simular comportamientos, etc.

En grandes líneas, y a los efectos de su utilización en arquitectura, nos referiremos a dos tipologías de algoritmos:

³⁶ La “Máquina de Turing” es un modelo matemático consistente en un autómata que es capaz de “implementar cualquier problema matemático expresado a través de un algoritmo”. La máquina de Turing manipula símbolos sobre una tira de cinta siguiendo una serie de reglas. <https://formatalent.com/que-es-una-maquina-de-turing-y-como-funciona/>

Algoritmos evolutivos: Dentro de esta categoría se analizarán los algoritmos genéticos que son los utilizados por la arquitectura compleja.

Algoritmos generativos: Los algoritmos utilizados con el fin de establecer sistemas formales se denominan “generativos” permitiendo el acceso, tanto a nuevas estructuras formales, como a geometrías complejas.

ALGORITMOS GENERATIVOS. DETERMINACIÓN DE SISTEMAS FORMALES PARTIENDO DE OBJETOS Y REGLAS GEOMÉTRICOS

Hablar de algoritmos generativos con el único propósito de hallar un sistema formal, no implica generar arquitectura compleja; para ello, necesitamos que en la generación de la forma, intervengan las interrelaciones entre variables intrínsecas y extrínsecas de incidencia en la obra.

“En cuanto al empleo de algoritmos geométricos o matemáticos para definir la forma o la configuración de los proyectos, éstos se presentan como una estrategia de gran potencial con la que afrontar el desarrollo de formas libres o azarosas en la arquitectura contemporánea.” (Bernabeu Larena, 2007, p. 101).

La metodología generativa que hace uso de los algoritmos a efectos de establecer sistemas formales, parte de determinadas formas a las que se les impone reglas específicas a seguir, aplicándolas recursivamente a las formas iniciales. De este modo, se obtienen otras formas a las que se les aplica las mismas u otras reglas, hasta llegar a las formas finales, que determinan un sistema formal.

Según Rudolph Wittkower (1949), en “Principios arquitectónicos en la era del urbanismo” expresa:

León Battista Alberti (1404 – 1474) ya utilizaba esta metodología de trabajo que, según Wittkower (1949), usaba una especie de gramática formal que le permitía combinar columnas con entablamentos, y pilares con arcos, pero nunca al revés. Andrea Palladio (1508 – 1580), según el mismo autor, generó las plantas y los alzados de sus famosas villas con una técnica basada en su deducción lógica a partir de una generatriz inicial y siguiendo una serie de reglas más o menos formales, ya analizado en la sección de análisis de su obra.

La diferencia no está en el método, sino en las herramientas que contamos para formular nuestros sistemas formales, hoy la informática nos permite acceder a geometrías diferenciales y algebraicas -impensadas por los arquitectos hace veinte años- lo que nos enfrenta a nuevos lenguajes arquitectónicos que tendrán su incidencia en la configuración espacial.

“Probablemente, desde el nacimiento de la perspectiva, no haya existido ninguna época en la que la herramienta utilizada condicione la producción arquitectónica de una manera tan determinante”. (Fullaondo, 2006, p. 1).

La necesidad de recurrir a la geometría euclídea para la determinación de la forma, contrasta con la multiplicidad de opciones de un sistema generativo formulado mediante algoritmos generativos; para Eisenman, las herramientas informáticas tienen la capacidad de generar virtualmente formas de modo ilimitado.

La utilización de algoritmos generativos en búsqueda de un lenguaje formal, dan lugar a una gramática generativa de la forma; la expresión “gramática generativa” proviene de la lingüística e introducida en 1957 por Noam Chomsky (1928 – 2008), en su publicación “Estructuras sintácticas”

La gramática generativa mediante el empleo de reglas, descompone las oraciones en partes más pequeñas. Estas se combinan mediante nuevas reglas. Este procedimiento da lugar a diferentes estructuras de la oración. Reiterando las nociones introducidas en la lingüística por el lingüista danés Louis Hjelmslev (1899 – 1965), Chomsky estableció que este conjunto limitado de reglas «genera» todas y cada una las oraciones gramaticales de un idioma dado, que son infinitas en número

Este proceso de aplicación reiterada de reglas, dio lugar en arquitectura a una gramática generativa de la forma.

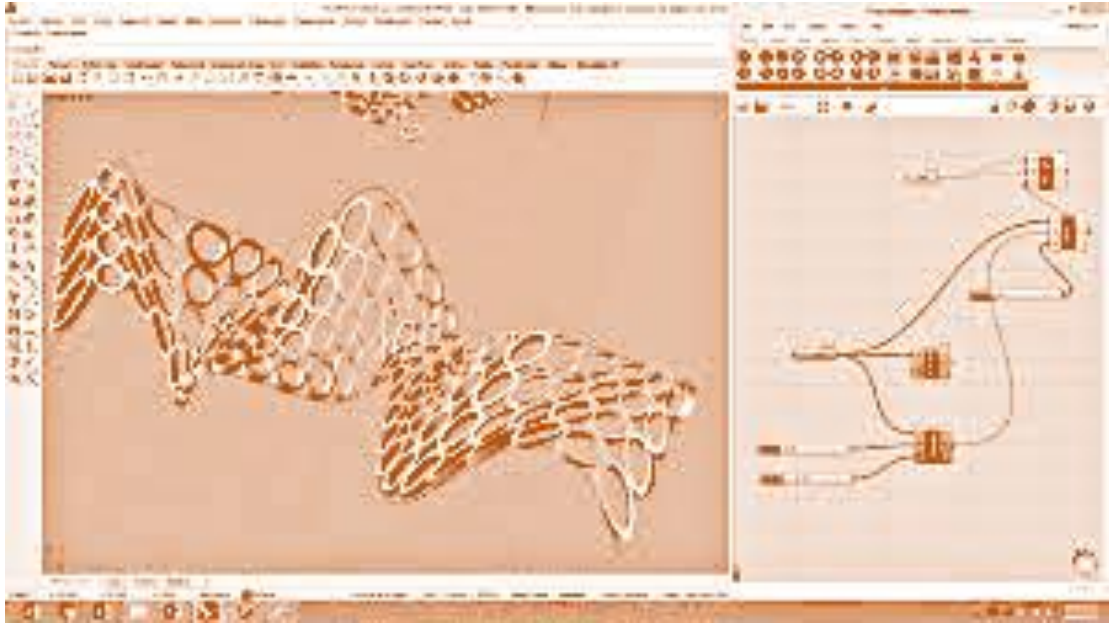


Fig. 205: Ensamble orgánico de tres curvas con parametrización con Grasshopper.
 Fuente: <http://tlamati.uagro.mx/t83e/t83eVII5.pdf>

La arquitectura de los arquitectos denominados *New York Five* (Peter Eisenman, Robert Graves, Charles Gwathmey, John Hejduk y Richard Meier) fue la primera y más importante aplicación del concepto de gramática generativa a la generación de formas. Su trabajo, especialmente los diseños de Eisenman para las *Casas I-X*, parten de formas geométricas autónomas, supuestamente de origen racionalista (Terragni, Le Corbusier, neo-cubismo, etc.) que se deforman y transforman según los dictados de una *gramática*, tal y como la muestran sus propios diagramas generativos. (Sola Morales, 2004, p.7)

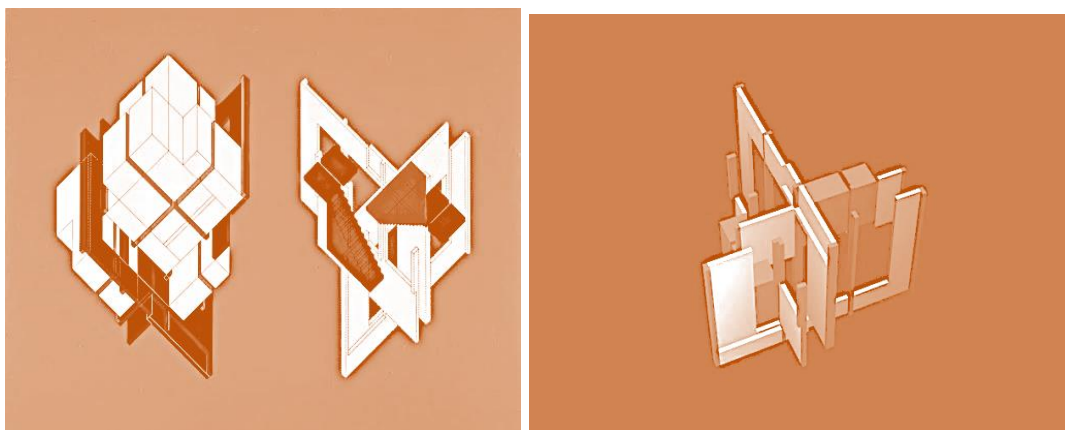


Fig. 206: Algoritmo generativo de formulación de sistema formal.
 Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/casa-vi/>

Estas arquitecturas, no son otra cosa que el producto del empleo de nuevos mecanismos de procesos generativos que tienen que ver con la racionalidad, el formalismo y el proceso. Es decir, afianzan el pensamiento de la simplificación, reduccionista y

determinista pero valiéndose del algoritmo mismo, ya que partiendo de un código determinado que posteriormente puede ser graficado y modelizado virtualmente, se llega a crear gran variedad de formalizaciones, aunque todas ellas, estarán orientadas en una misma línea de investigación formal y tendrán un orden en común. En este proceso no tienen lugar los emergentes ni la impredecibilidad, intrínsecas a la complejidad surgida de la esencia misma del algoritmo, entendido en términos de la complejidad.

Lo que se debe tener en cuenta es que si bien los sistemas generativos constituyen sistemas formales, en la arquitectura compleja, lo formal no se corresponde con los valores estéticos de una sociedad en un tiempo determinado, sino que la morfología por ellos generada es una respuesta a necesidades y condicionantes de la obra misma que constituyen las variables intervinientes en el proceso de diseño y concreción.

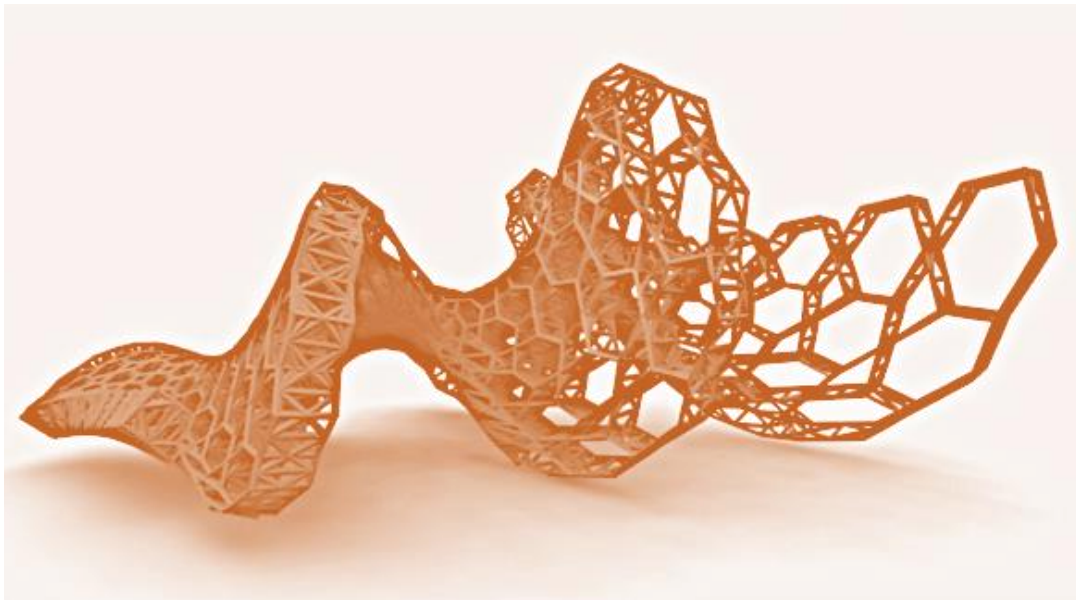


Fig. 207: Generación de formas orgánicas aplicando algoritmos generativos al diseño paramétrico
Fuente: <https://www.espaciobim.com/arquitectura-generativa-diseno-parametrizado>

Actualmente, los Algoritmos Generativos permiten crear la tecnología necesaria para simular el comportamiento evolutivo de la naturaleza, explorando nuevas formas y soluciones geométricas, pero ellas deberán responder a una aproximación en la optimización de las soluciones.

Como ejemplo se puede citar al *Voxman Music Building* en la Universidad de Iowa (2017) de *LMN Architects*, quienes afirman:

Se “celebra la actuación musical en todo momento, abrazando un modelo de educación colaborativo impulsado por estudiantes que trata cada espacio como un espacio de actuación”³⁷.

La morfología resultante no responde a presupuestos simplemente formales, sino a la interacción entre variables; de esta forma lo expresan los Arquitectos y la Arquitecta Wendy Pautz:

(...) “La sala de conciertos cuenta con un sistema de "teatro acústico" suspendido, que unifica la acústica, la iluminación y los requisitos de seguridad humana en una expresión arquitectónica dramática y multifuncional, y el elemento intrincadamente esculpido resultante se ensambla digitalmente a partir de 946 módulos compuestos únicos de aluminio plegado, fabricado a partir de módulos diseñados digitalmente y fabricados a partir del modelo paramétrico de los arquitectos.

En la sala de recitales, los paneles acústicos de color rojo optimizan las propiedades acústicas de la sala al tiempo que incorporan una ventana de vidrio con tejas del tamaño de una pared que une el evento de actuación con la experiencia urbana.”³⁸

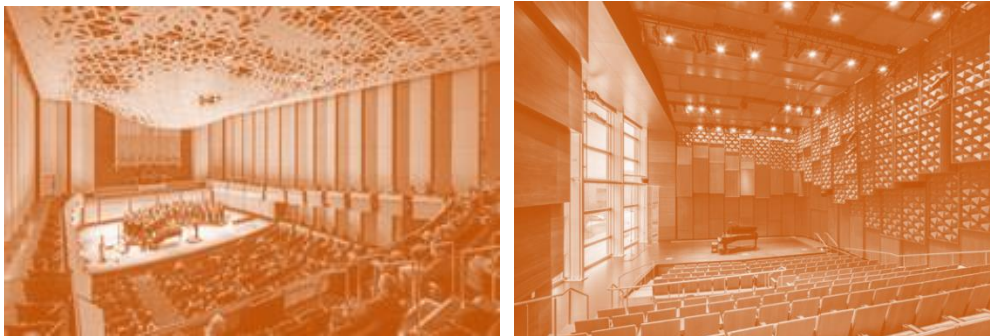


Fig. 208: Edificio de música Voxman / LMN Architects
Fotografías: Tim Griffith , Adam Hunter y Arturo Rojas.

Fuente: https://www.archdaily.com/886640/voxman-music-building-lmn-architects?ad_medium=gallery

³⁷ ARQA Argentina. <https://arqa.com/arquitectura/voxman-music-building-at-the-university-of-iowa.html>

³⁸ ARQA Argentina. <https://arqa.com/arquitectura/voxman-music-building-at-the-university-of-iowa.html>

En la era del diseño generativo, las personas y las computadoras manejan los datos de construcción para co-crear elementos que no podrían haberse concebido ni construido con métodos tradicionales, tal como ocurre con el techo acústico de la sala de conciertos de la Escuela de Música Voxman de la Universidad de Iowa, la cual se muestra en la Fig. 208; foto cedida por Tim Griffith.

ALGORITMOS GENÉTICOS

La simulación de procesos de evolución natural de las especies dio como resultado una técnica de optimización estocástica³⁹ que posteriormente fue llamada “algoritmos evolutivos”, y que fueron enmarcados dentro de las técnicas no convencionales de optimización.

A partir de la creación de estas estrategias evolutivas aparecieron otras vías de investigación como son: Algoritmos Genéticos (Goldberg), Programación Genética (Koza), Programación Evolutiva (Fogel), y Estrategias de Evolución (Rechenberg/Schwefel), en donde la estrategia de evolución más conocida hoy en día son los algoritmos genéticos. (Mateos Andaluz, 2004, p. 3).

El empleo de analogías con sistemas naturales o sociales para diseñar métodos heurísticos no determinísticos, se basa en los algoritmos evolutivos, de los cuales forman parte los genéticos, dando origen a la computación bioinspirada.

Los algoritmos bioinspirados modelan de forma aproximada, un fenómeno existente en la naturaleza, constituyendo una metáfora biológica para la resolución de problemas; a menudo presentan, implícitamente, una estructura paralela lo que implica multiplicidad de agentes y utilizan realimentación con el entorno para modificar el modelo y los parámetros; es decir, son adaptativos.

Los algoritmos evolutivos son aptos para resolver problemas de alta complejidad por la cantidad de variables intervinientes en la problemática a resolver y la dependencia sensible existente entre ellas.

³⁹ Se denomina estocástico al sistema cuyo comportamiento es intrínsecamente no determinista, en la medida que el subsiguiente estado del sistema está determinado tanto por las acciones predecibles del proceso como por elementos aleatorios.

Si bien en muchos problemas probabilísticos se usan variables aleatorias fijas, en los procesos estocásticos necesitamos especificar las variables aleatorias para cada instante del tiempo.

Los algoritmos bioinspirados modelan de forma aproximada un fenómeno existente en la naturaleza, constituyendo así una metáfora biológica para resolver problemas (...) son especialmente útiles cuando nos encontramos con problemas difíciles o altamente irresolubles, como lo son aquellos caracterizados por una alta dimensionalidad, multimodalidad, fuerte no linealidad, no diferenciabilidad, presencia de ruido y cuando se trata con funciones dependientes del tiempo. (Mateos Andaluz, 2004, p. 3).

Los métodos evolutivos de los algoritmos bioinspirados, buscan reproducir el proceso de desarrollo de las especies, simulando la adaptación, reproducción, cruzamiento y selección genética. Entre los diversos algoritmos evolutivos, el más popular es el algoritmo genético, que simula la evolución entendida como la adaptación de un grupo de soluciones candidatas a unos criterios predefinidos, realizando cambios aleatorios para llegar a ellos, generación tras generación, a la solución “más apta”.

Específicamente, el algoritmo genético se basa en la distinción entre el genotipo, que es el conjunto de todos los genes que forman los cromosomas y que determinan las características de cada especie, y el fenotipo, que controla la relación entre el individuo y el medio. (Andaluz, Mateos 2004, p. 7).

La primera publicación sobre algoritmos genéticos (AG), la realizó en 1975 John Holland, de la Universidad de Michigan. Holland, se propuso determinados objetivos al encarar su investigación:

1. Imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales;
2. Diseñar sistemas artificiales informáticos, que reproduzcan metafóricamente, los determinados mecanismos de los sistemas naturales.

Según la teoría darwiniana, a lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes; los algoritmos genéticos actúan por imitación de este proceso, a efectos de ir creando diversas soluciones.

Operan de forma simultánea con varias soluciones, y no de manera secuencial como lo hacen las técnicas tradicionales; exploran multiplicidad de respuestas, desechando las ya halladas si son superadas por otras generadas con posterioridad, sin tener que volver a empezar de cero como con los métodos tradicionales.

Debido a la habilidad que poseen para manipular muchos parámetros simultáneamente, se torna interesante su uso cuando se presenta el caso de resolver varios objetivos a la vez.

Utilizan operadores probabilísticos, en vez de los tradicionales operadores determinísticos llegando a obtener en cada caso un abanico de soluciones.

Un problema de optimización requiere hallar un conjunto de parámetros de forma que se cumpla un cierto criterio de calidad que se quiere optimizar,

Matemáticamente, optimizar una función de evaluación $f(x)$ consiste en maximizarla o minimizarla en un dominio determinado.

Maximizar una función $f(x)$ implica hallar los máximos valores y/o mínimos dentro de un entorno de definición, pudiendo ser locales, si abarcan un entorno incluido en el dominio, o absolutos si es el máximo o mínimo de todo el dominio considerado.

Es decir, enfrentar una problemática de optimización utilizando algoritmos genéticos, implica maximizar o minimizar una función objetivo. (Andaluz Mateos, 2004, p. 7)

Los algoritmos genéticos, dado su diseño y formulación como un nuevo mecanismo para llegar a la optimización, no requieren información matemática adicional sobre optimización -aunque sí, en su forma genérica se formulan en base en conceptos matemáticos – ya que trabajan en base a una población que les permite tomar otro tipo de funciones objetivo y todo tipo de restricciones (lineales y no lineales) definidas sobre espacios discretos, continuos o espacios de búsqueda combinados.

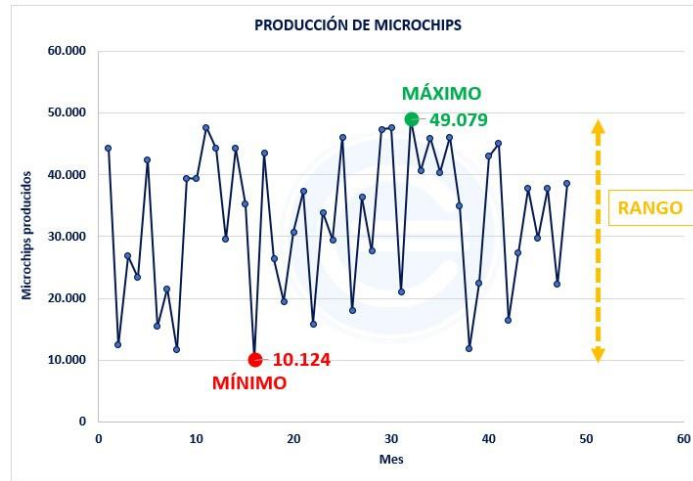


Fig. 209: Máximo y mínimo absoluto referido a la producción de una empresa
Fuente: <https://economipedia.com/definiciones/rango-estadistica.html>

En los algoritmos genéticos, al igual que en los evolutivos, se parte un conjunto de potenciales soluciones, llamado población.

Cada una de las soluciones se denomina “individuo” que a su vez está constituido por cadenas binarias⁴⁰ que representan el problema; los individuos son sometidos a cruce, inversión y mutación, tal como se observa en los organismos vivientes; luego son sometidos a un proceso de selección de las mejores soluciones.

Un individuo está conformado, a su vez, por cromosomas que responden a cada una de las variables involucradas en los procesos de optimización.

Cada ciclo de transformación y selección constituye una generación; después de cierto número de generaciones se espera que el mejor individuo de la población esté cerca de la solución buscada.

⁴⁰ Según la RAE, “una cadena binaria es una Serie de circuitos binarios, cada uno de los cuales puede afectar al circuito inmediato”. <http://diccionario.raing.es/es/lema/cadena-binaria>.
Lo binario alude al código de dos dígitos, 0 y 1 utilizado por los programas para que la información pueda ser procesada por una computadora.

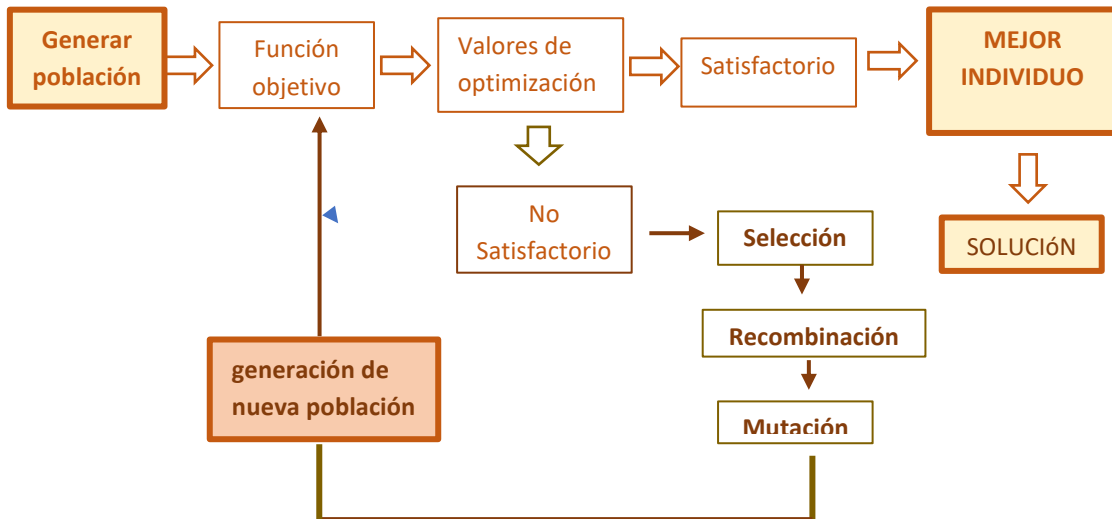


Fig. 210: Estructura típica de un algoritmo evolutivo.
Fuente: Elaboración propia

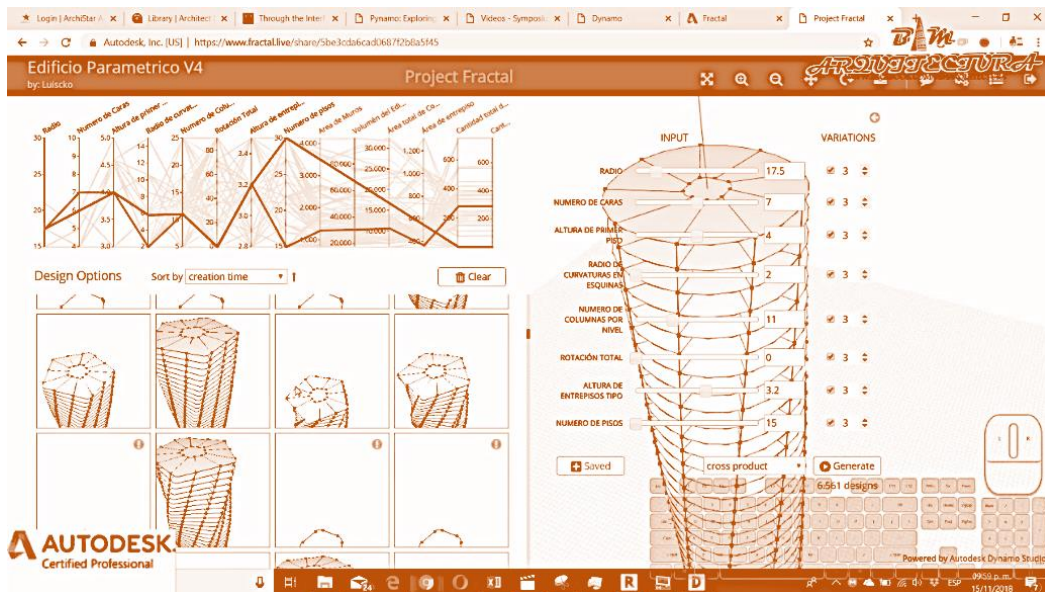


Fig. 211: Captura de pantalla Autodesk. Optimización de distintas variables utilizando diseño generativo.
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=jKB6iEZUnAo>

La cualidad fundamental de esta estrategia de trabajo es poder generar soluciones sin concepciones preconcebidas formales, estructurales o geométricas, pero se debe tener presente que el conocimiento del arquitecto y el paradigma al que pertenece, está implícito en la definición del genotipo al plantear la función objetivo, al igual que la selección de variables y sus reglas de combinación.

A la hora de valorar la aplicación de esta estrategia de diseño en proyectos concretos, se puede considerar el empleo de procesos algorítmicos en dos grandes grupos:

- Sistemas de orden y organización del espacio. La teselación del plano o los elementos constitutivos de una configuración espacial estructural, están generados y organizados en función de un algoritmo.

- Sistemas de definición de patrones estructurales.

Se trata de procesos algorítmicos que generan una serie de elementos que, combinados entre sí, en función de unas reglas determinadas, dan como resultado la composición de una superficie o de una estructura tridimensional.

Un ejemplo de esta metodología de trabajo la presenta la formulación de revestimientos de fachadas utilizando procesos basados en fractales.

Cecil Balmond, en la fachada estructural del Victoria & Albert, propuso la utilización de un sistema basado en la repetición de tres figuras geométricas que derivan unas de otras siguiendo una lógica fractal.



Fig. 212: Utilización de revestimientos fractales Museo Victoria & Albert. Londres, 1996.

Fuente: <https://libeskind.com/work/va-museum-extension-competition/>

Fig. 213: Teselación de la fachadas de Federation Square. Melbourne, 1997-2002

Fuente: <https://architectureau.com/articles/fed-square-building-to-be-redeveloped/>

CONCLUSIÓN

A lo largo de estas páginas se ha intentado hallar, dentro del nuevo paradigma de diseño, la existencia de elementos abarcativos de la obra de arquitectura compleja, ordenadores y reguladores del proyecto desde su gestación hasta su concreción, válidos para todos y cada uno de los hechos arquitectónicos por ella generados.

En la academia se ha decretado, históricamente, que fue la matemática tanto desde lo geométrico como lo analítico, la herramienta que se constituyó como ordenadora del diseño e indispensable para su regulación y concreción, utilizando una geometría perceptible sensorialmente y un análisis matemático basado en esa misma geometría euclidiana; por añadidura, ambos, fueron fundantes de la lógica newtoniana. El círculo se cerraba y permanecíamos en la comodidad de lo establecido, pero esa comodidad fue perturbada por nuevos esquemas y modelizaciones científicas y filosóficas de la realidad, modificando la visión del aquí y ahora de la sociedad misma, sus creencias y en general su cosmovisión. Ciencia y sociedad en retroalimentación constante.

Un primer paso de la tesis consistió en indagar acerca de la veracidad de la matemática como herramienta de la arquitectura. Según la Real Academia Española, el término “herramienta” proviene del latín, *ferramenta*, dando entre otras, dos primeras acepciones: “Instrumento, por lo común de hierro o acero, con que trabajan los artesanos”. “Conjunto de instrumentos”. Es decir, al ser un instrumento, participa de la ejecución del objeto, pero no del objeto mismo.

Por lo cual, considerar a la geometría y la matemática como una herramienta, implica pensar que ambas no son constitutivas del hecho arquitectónico mismo, sino un elemento ajeno a él que una vez utilizado puede contribuir a otro fin.

La ciencia matemática que -en términos clásicos- parte de la cosmovisión de una sociedad determinada, la griega, mediante una única teoría geométrica, la euclidiana, munida de proporciones entre números enteros y simetrías, modelizó la naturaleza por cientos de años, dando elementos y diversas justificaciones a la arquitectura, a efectos de crear sus lenguajes y factibilizar su concreción

Si bien la matemática constituye una abstracción, se la resignificó en cada momento histórico para cumplir con los preceptos que el sistema establecido imponía; al mismo tiempo se iban ampliando y completando sus conceptos a medida que los esquemas

científicos lo requerían, pero siempre sosteniendo como base a la geometría euclidiana, la irrefutabilidad y la completitud.

Al mismo tiempo hasta el deconstructivismo, la matemática, basada en el análisis matemático derivado de la geometría euclidiana y el álgebra tradicional, proveyó al espacio de los cálculos necesarios que factibilizaban su concreción constructiva y estructural.

Por lo tanto, se puede afirmar que la matemática constituyó una herramienta en los paradigmas de diseño del pasado, lo que conduce a plantear una analogía entre el sistema matemático manejado históricamente y la arquitectura misma.

Matemáticamente, hasta que Kurt Gödel demuestra sus teoremas de Incompletitud, se pensaba a la matemática tradicional como un sistema completo; es decir, que si dentro del sistema aparecía un concepto que no podía demostrarse con los axiomas y definiciones existentes, siempre era posible encontrar, dentro del mismo sistema, un concepto que permitiese resolver el problema. Un ejemplo de ello es la aparición de los números complejos que surgen de la necesidad de resolver la raíz cuadrada de un número negativo.

Del mismo modo, en arquitectura, ante la aparición de una nueva concepción del espacio, se buscaba dentro de las herramientas geométricas y científicas vigentes, la que era de utilidad para configurar su espacio, siempre respetando la lógica newtoniana derivada de la euclidiana y bajo el sistema científico determinista que las incluye.

Lo que hicieron los teoremas de Incompletitud fue admitir que no siempre se va a poder demostrar -dentro del sistema- todos los conceptos que surjan de los desarrollos que partan de sus premisas. Fin del sistema completo y absoluto; se necesitaban otros sistemas matemáticos.

Para ello, se debió esperar que el paradigma creara nuevas herramientas que permitiesen desarrollar esas nuevas matemáticas y las creó: aparece en escena la informática que además de hacer crecer nuevas ramas de la geometría comienza a interrelacionarlas. Por ejemplo, la interrelación entre la geometría diferencial y el álgebra. La arquitectura no dejaría pasar por alto esta nueva oportunidad.

La “Incompletitud” de la que habla Gödel en la matemática, por la cual no existían dentro del sistema establecido, los elementos que permitiesen resolver todos problemas planteados desde aquel, en la arquitectura se manifiesta en la segunda mitad del siglo XX con la búsqueda de nuevos esquemas que satisfagan las necesidades de una sociedad que, habiendo confiado en una ciencia racionalista que conduciría al espíritu absoluto de Hegel, no pudo resolver temas como los estragos perpetrados en el medio ambiente, la pobreza o el SIDA.

La arquitectura debía abastecer las nuevas necesidades que planteaba la sociedad y una lógica basada en la geometría euclidiana no bastaba para ello. El deconstructivismo, en la exposición del MoMA de 1988, valiéndose de la misma geometría euclidiana mostró las contradicciones del sistema arquitectónico vigente, tal como Gödel demostró su teorema partiendo de un desarrollo tradicional matemático. La arquitectura del MoMA todavía no constituía la arquitectura compleja, simplemente se complicaban las formas, negación de geometría euclidiana y lógica newtoniana mediante; rebeldía adolescente sin la cual no se puede llegar a la adultez.

Se debió esperar a que el paradigma proveyese nuevas tecnologías y lo haría; el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad hacen su aparición en escena.

Concluyendo, se puede expresar que, hasta el deconstructivismo, la matemática basada en un único sistema, se desempeñó como herramienta de la arquitectura, proveyendo al espacio de los cálculos necesarios que factibilizaran su concreción y estructura resistente, al tiempo que resignificaba sus contenidos a efectos de formular una configuración espacial en concordancia con la cosmovisión de la sociedad que generaba un hecho arquitectónico determinado.

A partir de mediados del siglo XX, un nuevo paradigma se dibuja con su consabida implicancia en el diseño, el cual debió contemplar las categorías implícitas en el desarrollo sustentable, el tiempo, la impredecibilidad y los emergentes.

Será la tarea del nuevo paradigma de diseño el considerar nuevas formas de interrelación entre el sistema arquitectónico, el subsistema matemático que contiene y el estructural generado desde el nuevo sistema científico – tecnológico - matemático.

Por lo que queda referirse, en este momento, al papel que desempeña la matemática en el nuevo paradigma de diseño; si sigue comportándose como una herramienta del proyecto arquitectónico, exterior a éste, o cumple alguna otra función y de qué forma lo hace.

Alberto Sato en *Los tiempos del espacio* (2010) diserta sobre la construcción epocal del espacio por lo que estaría confirmada la existencia de una nueva configuración espacial en concordancia con el paradigma que transitamos, pero no especifica la incidencia y/o las interrelaciones generadas entre la matemática y la estructura resistente en esa configuración espacial.

Analizar el hecho arquitectónico en el momento actual, implica hacerlo desde la complejidad por lo cual debe considerárselo como un subsistema de la sociedad misma, teniendo en cuenta los criterios de la complejidad arquitectónica, la del sujeto que lo habita y la del proyectista, la de los demás componentes del sistema y la incertidumbre que conlleva la consideración de más de dos variables para el abordaje de una problemática científica determinada.

La forma compleja de encarar el proyecto no responde a planteos lineales, con lo cual sería imposible su resolución con una geometría basada en la linealidad conceptual como la euclídea y una estructura resistente formulada en base a ella, por añadidura estos sistemas consideran solamente tres dimensiones.

Es en este punto en donde entra el concepto de “red”, tan caro a las ciencias de la complejidad. Ya no podemos hablar de un grupo de conceptos geométrico matemáticos ordenadores del proyecto que, partiendo de ideas *a priori*, resume el programa a simples categorías funcionales y las relacione entre ellas, considerando determinadas variables del entorno con características culturales, sociales y estéticos vigentes al momento del proyecto.

En la arquitectura compleja, no existe un “*a priori*” ni una idea general inamovible del proyecto, ni una estética conforme a cánones establecidos; éstas surgirán del estudio de variables constitutivas del mismo y la incidencia de la variabilidad de ellas, tanto en forma aislada como en su interrelación con las demás variables.

Las estrategias utilizadas por la arquitectura compleja, todas ellas basadas en conceptualizaciones matemáticas que permiten interrelaciones, parametrizaciones y la

formulación de algoritmos, son implementadas por programas informáticos basados, a su vez, en desarrollos matemáticos.

La geometría misma de la forma resultará de la gráfica de funciones cuyo objetivo consiste en la optimización entre las interrelaciones de variables consideradas y sus emergentes, pudiendo ser aquellas físicas, perceptuales, conceptuales, estéticas, etc.

Por lo tanto, las interrelaciones mencionadas conforman una red, resultando el proyecto un sistema dinámico caótico con dependencia sensible, donde el mínimo cambio en una de las variables provocará un cambio radical en el resultado, conforme a la teoría del caos.

La geometría empleada en estas obras, muchas veces, no es perceptible o identificable sensorialmente; los cálculos empleados para la determinación de la estructura emergerán de la configuración espacial misma y, en muchos casos, surgen del diseño específico para un proyecto determinado y tampoco son visibles a primera vista.

Estructura resistente y configuración espacial constituirán un todo permitido por las nuevas tecnologías de fabricación, que lleva a elaborar formas de concreción a medida que se va desarrollando el proyecto, al punto que en ámbitos en los que se utiliza la informática para diseñar, no para dibujar, se está hablando de “paradigma de la fabricación”.

Visto desde los parámetros expuestos, el elemento ordenador y regulador de todo proyecto es la red de conceptos geométrico matemáticos subyacentes a él, mientras que la informática es la herramienta que lo posibilita. En consecuencia, en la actualidad encontramos multiplicidad de resoluciones y estéticas: cada proyecto es único en sus necesidades y cada proyectista es una variable más dentro del proyecto. Esta última variable, junto a su mirada de la realidad, también es única y la volcará al proyecto.

El presente desarrollo llega al año 2014 con la exposición del MoMA, “Fundamentals” en la que se han considerado la evolución de la arquitectura en los últimos cien años y sus constantes, con el fin de indagar su estado actual y prospectivas, teniendo en cuenta la multiplicidad cultural. Estamos ante un nuevo planteo que incluye la interculturalidad y la visión de futuro. Muerte total de absoluto que podrían generarse en un presente.

Ya que se aludió a la “adolescencia de la arquitectura” con el deconstructivismo, pero una vez que es dejado de lado -y hasta el 2014-, podríamos referir a la “juventud”.

Experimentación de la libertad habilitada por el paradigma con su multiplicidad de miradas, todas ellas válidas, respaldadas por nuevas tecnología con las que ensayar. En este momento estamos, nuevamente, volviendo la vista atrás para aprender y resignificar elementos pasados. ¿Estaremos entrando en la “adulterez”?

Este último interrogante se consolida al considerar, que desde aproximadamente el año 2012, ha ido en aumento el empleo de las nuevas tecnologías para los desarrollos de viviendas de necesidad o emergencia social, obteniendo mayor identificación de los beneficiarios directos con los complejos habitacionales, optimizaciones en tiempo de ejecución, en inversiones financieras, disminución de residuos de la construcción y ahorro energético durante la vida útil de la construcción.

Las obras analizadas en estas páginas, pertenecientes a importantes instituciones empresariales, culturales o gubernamentales, se constituyen en hechos arquitectónicos icónicos a nivel urbanístico, por ser los primeros en apropiarse de las nuevas tecnologías teniendo en cuenta el medio ambiente y las componentes socio culturales, a efectos de mostrar su poder económico, cultural o social; tecnologías hoy puestas a disposición de necesidades sociales.

Por el momento, hemos verificado una continuidad de la interrelación entre discursos matemáticos y configurativo estructurales.

Queda pendiente la posibilidad de análisis de la formulación de distintas redes matemáticas subyacentes en las interrelaciones de otras variables del proyecto, tales como configuración espacial y desarrollo social. Está de más aclarar que en la red mencionada, no sólo deberíamos incluir estudios geométricos, sino estadísticos, tomando en cuenta tanto la estadística descriptiva, como la inferencial en sus dos ramas, la paramétrica y la no paramétrica; para el estudio de otras redes se necesitarán otras ramas de la matemática, con empleo de la informática en cada una de ellas y con programas específicos para su desarrollo.

Al ir demostrando la existencia de las diversas redes y la interrelación entre ellas, tenderemos a inferir que subyace una red matemática en la totalidad del proyecto, conformada por la interrelación de variables, permitida por la tecnología.

Independientemente de las nuevas indagaciones sobre redes y la interrelación entre discursos matemáticos con los planteados por otras variables, desarrollar un tema

arquitectónico basado en la matemática y la informática, donde por añadidura se encara la morfogénesis como la generación de la forma mediante la parametrización de variables, con la manipulación de cuantificaciones que ello implica, puede generar la falsa idea de que se ha dejado de lado la creatividad.

Muy por el contrario, la presente tesis pone en evidencia la necesidad de una reformulación de los conceptos de la creatividad donde queda fuera de lugar discusiones como la utilización para el diseño de la mano o la computadora; o el otro precepto donde la matemática, como fiel representante de las ciencias duras, implica una barrera de la imaginación, por ende, de la creatividad.

Hasta el momento, la forma en que se viene concibiendo la creatividad y actuando conforme a ella, no se ha encargado de muchos de los grandes problemas que aquejan a la humanidad. El nuevo paradigma científico social, con su aceleración en la producción y aplicación de las nuevas tecnologías, de la mano de una conciencia del ser humano como variable integrante de un universo, nos brinda una oportunidad.

El compromiso ético del proyectista con la sociedad y el medio ambiente, sólo es posible al día de hoy, mediante la implementación de la informática con base en la matemática, debido a la asunción del proyecto desde la multiplicidad de variables, requiere una nueva conciencia de la creatividad, alejada de concepciones simplemente románticas o tecnológicas.

Entender la creatividad en estos términos requiere interpretar a la complejidad como una condición inherente a la relación entre matemáticas y proyectos, en permanente y auspiciosa redefinición hacia la consecución de nuevos objetivos en la transformación positiva de nuestro hábitat.

Si bien estos últimos párrafos refieren a la creatividad, creemos que este tema ameritaría, bajo los términos enunciados, una investigación ulterior.

BIBLIOGRAFIA

- Alberti, L. B. (1991 [1485]). *De Re Aedificatoria*. Madrid: Editorial Akal.
- Alexander, C. (1981). *El modo intemporal de construir*. Barcelona: Editorial Gili.
- Allen, Stan. (1997). Architecture after Geometry. *Architectural Design*, vol. 67 no.5/6 May/June, pp. 24-31.
- Andaluz, M. (2004). *Algoritmos evolutivos – Algoritmos genéticos*. Universidad Carlos III. Madrid. <https://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicas/estudios/aeag>
- Argan, G. C. (1965). Capítulo XIV. El Cinquecento Italiano En: René Huyghe (coord.), *El arte y el hombre*. París-Buenos Aires-México: Editorial Larousse, pp. 396-410
- Argan, G. C. (1965). *Proyecto y destino*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Argan, G. C. (1973). *El concepto del espacio arquitectónico del barroco a nuestros días*. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.
- Argan, G. C. (1976). *Renacimiento y barroco II. De Miguel Ángel a Tiépolo*. Madrid: Akal.
- Arroyave D. I., Gómez E. D., Jiménez J. A., Londoño S. L., et al. (2003). *Manual de iniciación pedagógica al pensamiento complejo*. [Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000131357>].
- Atiyah, Michael (2002). “Las Matemáticas del siglo XX”. *Revista de la didáctica de la Matemática. Vol. 50. Simposio sobre el año mundial de las Matemáticas*. Toronto, Canadá.
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Londres: Chapman & Hall.
- Bachelard, G. (2003). *La filosofía del no. Ensayo de una filosofía de un nuevo espíritu científico*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Balmond, C. (2002) *Informal*. New York: Prestel.
- Banks, M. (2010). *Los datos visuales en investigación cualitativa*. Madrid: Ediciones Morata.
- Barba, J. J. (2015). “El mejor ejemplo de las casas de la pradera: la casa Robie”. [Recuperado en <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-mejor-ejemplo-de-las-casas-de-lapradera-la-casa-robie>].
- Battisti, E. (1966). Cap. XIV. El Quattrocento, Tomo II. En: René Huyghe (coord.), *El arte y el hombre*. París-Buenos Aires-México: Editorial Larousse, pp. 383-394.
- Batty, M. (1997). Sobre el crecimiento de la ciudad. *Fisuras de la cultura contemporánea: Revista de Arquitectura de Bolsillo*, N° 5, España, p. 4.

- Benévolo, L. (1987). *Historia de la Arquitectura Moderna*, Barcelona: Ed. Gustavo Gili, (sexta edición ampliada).
- Bennett M. y Dennett D. (2007). *Neuroscience and Philosophy: Brain, Mind, and Language*. New York: Columbia University Press.
- Bermúdez, J. L. (2007). “Objetos, propiedades, y dos tipos de enlace”. En: González, J. (Ed.), *Perspectivas contemporáneas*. México: Siglo XXI Editores-Universidad Autónoma del Estado de Morelos, pp. 93-109.
- Bernabeu Larena, A. (2007). Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea: El trabajo de Cecil Balmond. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio https://oa.upm.es/910/1/Alejandro_Bernabeu_Larena.pdf
- Bertalanffy, L. von (1989). *Teoría general de los sistemas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Böhr, N. (1988). *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Madrid: Alianza.
- Bourdieu, P. (2007). *El sentido práctico*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Bosyk, G. M. (2014). “Más allá de Heisenberg. Relaciones de incerteza tipo Landau-Pollak y tipo entrópicas”. La Plata, Ed. Universidad Nacional de La Plata. Recuperado en : <http://sedici.unlp.edu.ar>.
- Boudon, P. (1980). *Del espacio arquitectónico. Ensayo de epistemología de la arquitectura*. Buenos Aires: Victor Lerú.
- Bunge, M. (1983). “Paradigmas y revoluciones en ciencias y técnica”. En: *El Basilisco: Revista de materialismo filosófico*. (15), pp. 1-9. Recuperado en: [file:///C:/Users/cschi/Downloads/Dialnet-ParadigmasYRevolucionesEnCienciaYTecnica-2473035%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/cschi/Downloads/Dialnet-ParadigmasYRevolucionesEnCienciaYTecnica-2473035%20(1).pdf)
- Burke, E. (2014). *Indagación filosófica sobre el origen de nuestras ideas acerca de lo sublime y lo bello*. España: Alianza Editorial.
- Bustillo, G. (2014). *El siglo XVIII y la invención de un orden moderno*. Farqu/undlr Montevideo Uruguay.
- Cabas García, M. (2010). Conceptualización del espacio arquitectónico a través de la historia. *Revista Módulo / Volumen 1, Número 9 / Julio 2010*. Barranquilla, Colombia, pp. 87-103.
- Cabas García, M. (2014). El espacio arquitectónico contemporáneo bajo las seis propuestas para el nuevo milenio de Italo Calvino. *Revista Traza*, (10), Barranquilla, Colombia: Universidad de la Costa (CUC), pp. 74-85.

- Camara, A. (coord.) (2005). *Los ingenieros militares de la monarquía hispánica en los siglos XVII y XVIII*, Ministerio de Defensa, Asociación Española de Amigos de los Castillos, Centro de Estudios Europa Hispánica, Madrid.
- Campo Baeza, A. (2002). “Memoria del Proyecto para el concurso del proyecto del Museo Mercedes Benz”. Recuperado en <https://www.campobaeza.com/es/mercedes-benz-museum/>
- Cardellach, F. (1970). *Filosofía de las estructuras*, Barcelona: Editores Técnicos asociados.
- Castellanos Garzón, G. (2015). La arquitectura: una visión desde la complejidad. El pensamiento del espacio, un espacio para el pensamiento. *Revista Nodo*, 9(19), pp. 58-72.
- Castillo, C. I. (2019). “Geometría diferencial”. España: Universidad de Valencia. Recuperado en: <https://www.uv.es/ivorra/Libros/GD.pdf>
- Chamoux, F. (1965). El mundo romano desde Sila a los Severos (del s. I a. de C. a comienzos del s. III d. de C.). En: René Huyghe (coord.), *El arte y el hombre*, Vol. 1, París-Buenos Aires-México: Editorial Larousse, pp. 345-354.
- Chaparro Laura (2000) “El control de la forma geométrica en Le Corbusier” de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/1556/1/5511.pdf>
- Collins, P. (1998). Los ideales de la arquitectura moderna; su evolución (1750- 1950), Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Rowe, C. (1978 [1965]). La estructura de Chicago. *Architectural Review* 1956. Reproducido en *Manierismo y arquitectura moderna y otros ensayos*. Barcelona: Edit. Gustavo Gili.
- Coloma Picó, E. (2008). Introducción a la tecnología BIM, publicado por *Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I Secció Geometria Descriptiva Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya*. Recuperado en: <http://www.practicaintegrada.com/storage/tecnologiabim/Introducción a la Tecnología BIM.pdf>
- Costanzo, M. (2006) *MVRDV: works and projects 1991-2006*. Milano: Skira.
- Cortés, J. A. (1998). La geometría ha muerto, ¡viva la geometría. *CIRCO M.R.T. MADRID*. Editado por: Luis M. Mansilla, Luis Rojo y Emilio Tuñón. Recuperado en: <http://web.arch-mag.com> e-mail: circo@arch-mag.com

- De Conches, G. (2015) *Filosofía del mundo*. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata Grupo de Investigación y Estudios Medievales.
- De Stefani C. (2009). Reflexiones sobre los conceptos de espacio y lugar en la arquitectura del siglo XX. En: *Revista Electrónica DU&P. Diseño Urbano y Paisaje Volumen V*, N°16. Santiago, Chile: Centro de Estudios Arquitectónicos, Urbanísticos y del Paisaje Universidad Central de Chile.
- Deleuze, G., Guattari, F. (2004). *Mil mesetas. Capitalismo y esquizofrenia*. Valencia: pre-textos.
- Delgado Díaz, C. (2008). *Hacia un nuevo saber. La bioética en la revolución contemporánea del saber*. Bogotá, D.C.: El Bosque.
- Delgado Díaz, C. (2015). *De la Pluri a la Interdisciplinariedad*. Obtenido de Nodo. Transdisciplina, investigación e intervención en el cambio:
http://doctorado.edgarmorin.mx/file.php/2/Clase_del_Modulo_9.pdf
- Descola, P. (2001). Construyendo naturalezas. Ecología simbólica y práctica social. En: Philippe Descola y G. Pálsson (coords.), *Naturaleza y sociedad. Perspectivas antropológicas*. México: Siglo XXI, pp. 101–123.
- Descola, P y Pálsson, G. (coords). *Naturaleza y sociedad. Perspectivas antropológicas*. México: Siglo XXI.
- Delgado Díaz, C. J. (2008). *Hacia un nuevo saber. La bioética en la revolución contemporánea del saber*. Ediciones: El Bosque. Recuperado en:
https://issuu.com/universidadelbosque/docs/bios_y_oikos_vol2
- Descartes, R. (2006). *Discurso del método*. Madrid, España: Tecnos.
- Dollens, D.. (2002). *De lo digital a lo analógico*. Barcelona España: Edit. Gustavo Gili.
- Eisenman, P. *Eisenman House-I-1968. Textos seleccionados por y sobre Peter Eisenman*. Recuperado en: <https://eisenmanarchitects.com/>
- Eisenman, P. (2016). *Transformation, Decompositions and Critiques, House X*. En: Eisenman House X. Recuperado en
https://www.researchgate.net/publication/317272811_House_X_por_Peter_Eisenman_de_la_estetica_de_la_produccion_a_la_estetica_de_la_recepcion
- Eraña, A. (2009). Dos explicaciones alternativas del cambio conceptual. En: Eraña, A. y Mateos, G. (coords.). *La Cognición como Proceso Cultural*. Distrito Federal, México: Universidad Autónoma de México, pp.63-89).
- Estévez, A. (2008). “Arquitecturas genéticas”. *Barcelona: SITES Books / ESARQ-UIC*, Barcelona, España.

- Fernández, J. H. (2010). Paradigma de la Complejidad. Educación, Currículum y Praxis Docente. [Tesis de Maestría Universidad de la Bio-Bio – Sistema Bibliotecas de Chile] Repositorio: <http://repobib.ubiobio.cl>
- Fontana Cabezas, J. J. (2012) El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente. [Tesis doctoral Universitat d`Alacant Escuela Politécnica Superior Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía] Repositorio: <http://hdl.handle.net/10045/26859>.
- Fuentes Farías, J. F. (2012). Un acercamiento al espacio arquitectónico. *Revista de arquitectura*, Vol. 14, Universidad Católica de Colombia, pp. 36-42.
- Fraile, M. (Dir.) (2014). Modelos paramétricos digitales. Una herramienta proyectual para la generación de una arquitectura de alta performance, *Revista IAA*; FADU/UBA, pp. 1-8.
- Fraile, M. (2018). *Morfogénesis Digital. La Creación de un Paradigma Sostenible*. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo – Universidad de Buenos Aires Proyecto UBACyT (056) 2011-2014. Teoría de la Arquitectura en la Contemporaneidad. Recuperado: <http://ariel-amadio.com/docencia/wp-content/uploads/2018/09/Morfogenesis-digital.pdf>
- Fraile, M. (2019). *Arquitectura biodigital*. Ed. Buenos Aires: Diseño editorial.
- Fraile Narvaez, M. (2020). *Arquitectura Siglo XXI*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Diseño.
- Frazer, J. (1995). *A Natural Model for Architecture/The Nature of the Evolutionary Model, An Envolutionary Architecture*, Londres: Architectural Association Publications.
- Frixione, E. (2007). “Un modelo cuántico de la conciencia”. En: Frixione, E. (coord.) *Conciencia. Nuevas perspectivas en torno a un viejo problema*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Siglo XXI Editores, pp.81-95.
- Fuentes, F. J. (2011). La experiencia cualitativa en el paisaje y el espacio construido. *Revista sobre patrimonio cultural*. En: *Instituto Carlos Arbeláez Camacho para el Patrimonio Arquitectónico y Urbano (ICAC). Revista Apuntes 24 (2)*, pp.166-177.
- Fullaondo, M. (2006). Conciencia digital. En: *XI Congreso Internacional EGA*, Sevilla: *Architectural Design*, V. 79, I. 1.

- Galindo, J. (2000). La ciencia de los ingenieros... en la primera mitad del siglo. *Revista Informes de la Construcción*, vol.52, No 467, CSIC, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, pp. 47-54.
- García Barba, F. (2009). Borromini y la geometría. Recuperado en: <http://www.garciabarba.com/islasterritorio/borromini-y-la-geometria/>
- García, R., García-Milian, R., Jurado, R., García, A., García-Esteba, R. M. y Rodríguez, Rolando y Agudo, R. (2000). *El conocimiento en construcción. De las formulaciones de Jean Piaget a la teoría de sistemas complejos*. Ed. Gedisa.
- Gardinetti, M. (2016). “Manifiesto Parametricista”, Recuperado: <http://tecne.com/biblioteca/manifiesto-parametricista>.
- Garretón, J. (1975). *Una teoría cibernética de la ciudad y su sistema*, Ediciones Nueva Visión.
- Gausa, M. (2010). *Open: espacio, tiempo, información. Arquitectura, vivienda y ciudad contemporánea, teoría e historia de un cambio*. Barcelona: Ed. Actar.
- Gausa M. et al. (2015). *Diccionario Metápolis de Arquitectura Avanzada*. España: Ed. Actar.
- Gausa M., Salazar, J. (1999). *Singular Housing: El dominio privado*. Ed. Actar, España.
- Giddens, A. (2006). *La constitución de la sociedad. Bases para la teoría de la estructuración*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Gleick, J. (1987). *CAOS, la creación de una ciencia*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Gödel, K. (1981). *Obras Completas*. Madrid: Alianza Editorial.
- González, J. (Ed.). (2007). *Perspectivas contemporáneas sobre la cognición. Percepción, categorización y conceptualización*. México: Siglo XXI - Editores-Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- González Cobelo, J. L. (1996). La arquitectura y su doble. Idea y realidad en la obra de Daniel Libeskind. *Revista Croquis*, N° 80, pp. 30 – 39.
- González Sánchez, C. Y. (2012). *Aproximación de superficies desarrollables con Splines de conos circulares*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Escuela de Matemáticas. Recuperado en <http://bdigital.unal.edu.co/8004/1/43926171.2012.pdf>
- Gombrich, E. H. (1989). *La historia del arte*. México: Editorial Diana.
- Gómez-Jáuregui, V. (2008). Estructuras Tensegríticas: Ingeniería y Arquitectura Novedosas. *Ingeniería Civil*. Madrid: Servicio Publicaciones CEDEX, N° 152.

- Hawking, S. (2015). “¿Juega Dios a los Dados?” Recuperado en:
<http://metabase.uaem.mx/handle/123456789/2122>
- Hereu, P. (1998). *Teoría de l'arquitectura. L'ordre il'ornament*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Hernández, M. (1997). *La invención de la arquitectura*. Madrid: Celeste.
- Hohenwarter, M. (2015). *GeoGebra 3D*. Universidad de Salzburgo: Universidad de Linz, Austria.
- Hume, D. (2011). *Ensayos morales, políticos y literarios*. España: Ed. Trotta – Liberty Fund.
- Horgan, J. (1995). De la complejidad a la perplejidad. En: *Investigación y ciencia*, N° 227, pp. 71-77.
- Huyghe, R. (1966). *El arte y el hombre*. París-Buenos Aires-México: Editorial Larousse.
- Iborra Castillo, C. (2020). *Geometría Algebraica*. Departamento de Matemática para la Economía y la Empresa. Universidad de Valencia España. Recuperado en:
<https://www.uv.es/ivorra/Libros/GA.pdf>
- Jarauta Marión, F. (2003). *Condiciones contemporáneas de la arquitectura*. Valencia: Ediciones Generales de la Construcción.
- Johnson, P. y M. Wigley. (1988). *Arquitectura Deconstructivista*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Juárez, A. (1996a). El arte de construir con agujeros; Reflexiones en torno a Robert Le Recolais. *Revista Circo núm. 39*, CIRCO M.R.T. Coop. Madrid.
- Juárez, A. (1996b). A propósito de Robert Le Ricolais. *Revista Arquitectos*, N° 141, vol. 96/3, , Madrid: Consejo Superior de Arquitectos de España.
- Jordá, C. (2002). Texto introductorio: Historias próximas a Eduardo Torroja. *La vigencia de un legado. Eduardo Torroja*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, , Editorial SPUPV, pp. 19-58.
- Kantor, J. M. (2005). A tale of bridges: topology and architecture. *Nexus Network*, Vol. 7 Nro 2, Recuperado en:
https://www.researchgate.net/publication/227164427_A_Tale_of_Bridges_Topology_and_Architecture
- Kellert, S. H. (1993). *In the Wake of Chaos*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Kepes, G. (1969). *El lenguaje de la visión*. Buenos Aires: Ediciones Infinito.

- Kolarevic, B. (2000). Morfogénesis digital y Arquitecturas computacionales. En: *Proceedings of the 4th Conference of Congreso Iberoamericano de Grafica Digital, SIGRADI 2000 - Construindo (n) o Espaço Digital (Constructing the Digital Space)*, Rio de Janeiro (Brazil) 25–28 September 2000, ed. by José Ripper Kós, Andréa Pessoa Borde and Diana Rodriguez Barros, pp. 98-103.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York: Taylor & Francis.
- Kolarevic, B. (2012). Morfogénesis Digital y Arquitecturas Computacionales. En: *Actas de la 4ª Conferencia del Congreso Iberoamericano de Grafica Digital*, Río de Janeiro (Brasil).
- Koolhaas, R. (2014). *Latest Details Released on Koolhaas' Venice Biennale 2014 "Fundamentals"*. Recuperado en <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-343030/bienal-de-venecia-2014-fundamentals-koolhaas-revela-ultimos-detalles>.
- Kottas, D. (2013). *Arquitectura Digital. Nuevas aplicaciones*. Ed. Links Internacional.
- Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Siglo XXI.
- Lowe, E. J. (2000). *Filosofía de la mente*. Barcelona: Idea Universitaria.
- Landau, I. y Lifchitz, E. (1973). *Teoría clásica de los campos*. Barcelona: Reverté.
- Landau, I. y Lifchitz, E. (1981). *Teoría clásica de los campos*. Barcelona: Reverté.
- Larumbe Machín, T. (2015). *Estrategias geométrico-matemáticas en la obra de Le Corbusier (1923-1933)*. Edit. Escuela Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra. Recuperado en: <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/LC2015/LC2015/paper/viewFile/787/1296>
- Lázlo Moholy Nagy. (1963). *El espacio (arquitectura)*. Buenos Aires: La Nueva Visión, Ed. Infinito.
- Leach, N. (2009). Digital Morphogenesis. *Architectural Design*, Vol. 79, No1, Enero-Febrero.
- Le Corbusier. (1972) *Por las cuatro rutas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Le Corbusier. (1976) *Cómo concebir el urbanismo*. Buenos Aires: Ed. Infinito.
- Le Corbusier. (1978) *Hacia una arquitectura*. Buenos Aires: Poseidón,.
- Le Corbusier [Charles-Édouard Jeanneret-Gris]. (2006). *Hacia una arquitectura*. Barcelona: Editorial Apóstrofe.
- Le Ricolais, R. (1996). *Visions and Paradox; An Exhibition of the Work of Robert Le Ricolais, (catálogo)*, Meyerson Hall, University of Pennsylvania, Philadelphia, January-February.

- Letelier, L. P. (2011) “Estructuras dinámicas. Modelos Operativos en el Hemisferio Norte y Chile y sus posibilidades de aplicación Latinoamérica”. En: *Escuela de Arquitectura Universidad de Talca Chile*.
- Leubkeman, Ch. (1992). Form Swallows Function. *Revista Progressive Architecture*, vol. 73, No 5, Gale, White Bear Lake, Minnesota, Estados Unidos, mayo, pp.106-109.
- Lynn, G. (1992). Multiplicitous and Inorganic Bodies. *Assemblage*, (19), pp. 33-49.
- Lynn, G. (1999). *Animate Form*. Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.
- Luhmann, N. (1990). *Sociedad y sistema: la ambición de la teoría*. Barcelona: Paidós.
- Maldonado C. & Gómez Cruz, N. (2011). *El mundo de las ciencias de la complejidad: una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*. Editorial Universidad del Rosario.
- Marculli, A., González-Capitel Martínez, A. & Ibarra, G. (1978). *Teoría del campo: Curso de educación visual*. Madrid: Xarait.
- Martínez Miguélez, M. (2007). Conceptualización de la Transdisciplinariedad Polis. *Revista de la Universidad Bolivariana*, vol. 6, núm. 16, Santiago, Chile: Universidad de Los Lagos, pp. 1-17.
- Martínez, P., (2003). *Diseño Óptimo Simultáneo de Topología y Geometría de Estructuras Articuladas mediante Técnicas Evolutivas* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio <https://www.upct.es/~deyc/software/Thesis.pdf>
- Martínez – Piéiro (2009). *Gödel para todos*. Argentina: Ed. Titivillus.
- Massad, F. & Guerrero Yeste, A. (2004). Arquitectura digital. *Arquitectura en la época de la revolución digital*. Recuperado en: <https://arqa.com/actualidad/colaboraciones/arquitectura-en-la-epoca-de-la-revolucion-digital.html>
- Mateos Andaluz, A. (2004). *Inteligencia en Redes de la Comunicación. Algoritmos Evolutivos y Algoritmos Genéticos*. Madrid: Universidad Carlos III.
- Mc Cleary, P. (1997). Robert Le Ricolais. En : *Robert Le Ricolais. Visiones y Paradojas*, Madrid: Fundación Cultural COAM.
- Medina, V. (2012) *El filósofo y los arquitectos Deconstrucción de axiomas arquitectónicos a partir del discurso derrideano*. *Revista de Arquitectura Chile*,

- pp. p. 17-21. Recuperado en:
<https://dearquitectura.uchile.cl/index.php/RA/article/view/32509>
- Mejía Arauz, R. y Sandoval, S. E. (2009). *Tras las vetas de la investigación cualitativa. Perspectivas y acercamiento desde la práctica*. Guadalajara: Iteso.
- Molinare, A. (2022). "¿Qué es el diseño paramétrico?". *Plataforma Arquitectura*.
 Recuperado en: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-118243/%25c2%25bfque-es-el-diseno-parametrico>
- Montero Fernández, F. J. (1994). La representación gráfica del Panteón en el Renacimiento. En: *Actas del Quito Congreso Internacional de representación arquitectónica*. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 406-414.
- Montaner, J. M. (1997) *La Modernidad superada*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.
- Montaner, J. M. (1999). *Después del movimiento moderno: Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Montaner, J. M. (2002). *Las formas del siglo XX*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.
- Montaner, J. M. (2008). *Sistemas Arquitectónicos Contemporáneos*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Montaner, J. M. (2010). Arqueología de los diagramas. En: *Cuadernos de Proyectos Arquitectónicos*, 132/131.
- Montaner, J. M. (2014). *Del diagrama a las experiencias, hacia una arquitectura de la acción*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.
- Moreno Ortiz, J. C. (2005). El significado y el desafío de la complejidad para la bioética. *Revista Latinoamericana de Bioética*. Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia. Recuperado en:
<https://www.redalyc.org/pdf/1270/127020937001.pdf>
- Moreno J. C. (2002). *Manual de Iniciación Pedagógica al Pensamiento Complejo. Corporación para el d Desarrollo Complexus*. Instituto Colombiano de Fomento de la Educación Superior. UNESCO Velilla Marco Antonio Compilador Ediciones. Jurídicas Gustavo Ibáñez. Colombia.
- Morin, E. (1980). *El método II. La vida de la vida*. Cátedra Teorema.
- Morín E. (1982). *Para salir del siglo XX*. Barcelona: Ed. Kairós.
- Morin, E. (1984). *Ciencia con consciencia*. Barcelona: Anthropos Editorial del Hombre.
- Morin, E. (1988). *El método III. El conocimiento del conocimiento*. Madrid: Cátedra.
- Morin, E. (2004). *Introducción al Pensamiento Complejo*. Barcelona, España: Gedisa.

- Morin, E. (2002). Manual de iniciación pedagógica al pensamiento complejo. *Instituto colombiano de fomento de la educación superior*. UNESCO, Ediciones Jurídicas Gustavo Ibáñez.
- Morin, E. (2006). *El Método 4. Las ideas*. España: Ediciones Cátedra.
- Morin, E. (2008). *La cabeza bien puesta: repensar la reforma, reformar el pensamiento*. Buenos Aires: Nueva Visión.
- Morin, E. (2011a). *¿Hacia dónde va el mundo?* Barcelona, España: Paidós.
- Morin, E. (2011b). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. Barcelona, España: Paidós.
- Morin, E. Solana Ruiz, J. L. (2005). *Con Edgar Morín, por un pensamiento complejo. Implicaciones interdisciplinarias. El devenir del devenir (3)*. Madrid, España: Akal.
- Morin, E. y Le Moigne, J. L. (2006). *Inteligencia de la Complejidad. Epistemología y Pragmática*. Ediciones de l'aube.
- Muntañola, J. (1996). *La arquitectura como lugar*. Barcelona: Ediciones UPC.
- MVRDV (2005) "KM³ Excursions on Capacities". Editorial Actar; Edición Har/DVD
- Navarro, P. "El fenómeno de la complejidad social humana". *Curso de Doctorado Interdisciplinar en Sistemas Complejos*. Recuperado en: http://home.dsoc.uevora.pt/~eje/complexidade_social.html
- Navas, E. (2010). *Una humilde introducción a la graficación por computadora y otras yerbas*. El Salvador: Ed. Departamento de Electrónica e Informática, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1994). *La estructura de lo complejo*. España: Alianza Editorial.
- Nieto, V. (1978). *La luz, símbolo y sistema visual. El espacio y la luz en el arte gótico y del renacimiento*. Madrid: Ed. Cátedra (Grupo Anaya).
- Nietzsche, F. (1951 [1883]). *Así habló Zaratustra*, Buenos Aires: LEA.
- Nietzsche, F. (1954 [1882]). *Gay Science*, Nueva York: Viking.
- Nietzsche, F. (2011 [1887]). *La genealogía de la moral*. Argentina: Ed. Alianza Editorial.
- Norberg-Schulz, C. (1975). *Existencia, espacio y arquitectura*. Barcelona: Blume.
- Norberg-Schulz, C. (1998). *Intenciones en arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Norberg Schultz, C. (1999). *Arquitectura occidental*, Barcelona: Gustavo Gili.

- Norberg Schulz, C. (2005). *Los principios de la arquitectura moderna*. Barcelona: Reverté.
- Noriega, R. J. & L. A. Santaló. (2012). *Variedades diferenciables*. Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Oswalt, P. & Hollwich, M. (1998). *OMA at work*. **Archis**, N° 7, Rotterdam. Disponible en: http://www.oswalt.de/en/text/txt/omawork_p.html
- Palasmaa, J. (2011). *The Embodied Image. Imagination and imagery in Architecture*. Italia: Wiley.
- Papademetriou, P. (1992). Eero Saarinen. TWA Terminal. Il calcolo e l'invenzione. *Revista Casabella*, vol. 65, No 695-696, Electa, Milán, pp. 21-33.
- Pask, G. (1969). The Architectural relevance of cybernetics, *Architectural Design*, núm. 6 vol. 7, Nueva York, pp. 494-496.
- Penrose, R. (1989). *La mente nueva del emperador. En torno a la cibernética, la mente y las leyes de la física*. México: Consejo Nacional de ciencia y tecnología. Fondo de Cultura Económica.
- Pérez Soto, C. (1998). Sobre un concepto histórico de la ciencia. De la epistemología actual a la dialéctica. Apéndice No. 3. El método científico como ideología. Santiago de Chile: LOM. Universidad ARCIS, pp. 311-319.
- Piñon, H. (2005). *La Forma y la mirada*, Buenos Aires: Ed. Nobuko.
- Prigogine, I. (1999). Filosofía de la inestabilidad. *Voprosy Filosofii*, N.º 6, (46-52). Recuperado en: <https://iprigogine.files.wordpress.com/2014/07/filosofc3ada-de-la-inestabilidad-ilya-prigogine-con-comentario-de-un-cientc3adfico-ruso.pdf>.
- Prigogine, I. (2012). *El nacimiento del tiempo*. Barcelona: Tusquets.
- Quatremère de Quincy (1985 [1832]). *Diccionario de Arquitectura*. Ed. Nobuko.
- Quevedo y Letelier, L. (2010). *Estructuras dinámicas. Modelos operativos en el Hemisferio Norte y en Chile*. [Tesis doctoral].
- Rodríguez, E. R. (2015). *El Correcto y Completo Desarrollo de un Algoritmo*. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. México.
- Rodríguez, D. y Arnold, M. (1990). *Sociedad y teoría de sistemas*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Rorty, R. (2008). *Filosofía y futuro*. Barcelona: Gedisa.
- Rudofsky, B. (2007). *Constructores prodigiosos. Apuntes sobre una Historia Natural de la Arquitectura*. México: Editorial Pax.

- Ruiz Olabuénaga, J. (2003). *Metodología de la investigación cualitativa*. Bilbao: Universidad de Deusto.
- Rykwert, J. (1999). *La casa de Adán en el paraíso*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Salingaros, M. (2006). Charles Jenks y el nuevo paradigma en arquitectura. ARQA/AR
Recuperado en: <https://arqa.com/actualidad/colaboraciones/charles-jenks-y-el-nuevo-paradigma-en-arquitectura-3.html>
- Sánchez Morales, J.A. (2015). *Arquitectura-Filosofía: interacciones*. [Tesis Doctoral: Universidad de Alicante España]. Repositorios: https://issuu.com/pencho/docs/tesis__jas__nchezmorales__v2
- Sancho, J. M. (2014). “La arquitectura de la Ilustración en Europa”. Recuperado en: <https://sancho70art.wordpress.com/2014/09/07/la-arquitectura-de-la-ilustracion-en-europa/>
- Santos, B. (2009). *Una epistemología del sur: La reinención del conocimiento y la emancipación social*. México: Siglo XXI; CLACSO.
- Sato Kotani, A. (2010). *Los tiempos del espacio*. Caracas: Ed. CEC.
- Searle, J. (2009). La conciencia. En: J. González. *Filosofía y ciencias de la vida*. México: Fondo de Cultura Económica-UNAM, pp. 60-93.
- Schumacher, P. (2008). Parametricism as Style - Parametricist Manifesto. En: *Presented and discussed at the Dark Side Club1, 11th Architecture Biennale, Venice*.
Recuperado en: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>
- Sennett, R. (1991). *La conciencia del ojo*. Barcelona: Versal.
- Sheaa K., Aish, R, Gourtovaiaa, M. *Towards integrated performance driven generative design tools, Automation in Construction. Automation in Construction*, pp. 253-264.
- Singh, S. (1999) “El último Teorema de Fermat” Recamán Santos. Santa Fe de Bogotá Colombia: Grupo Editorial Norma.
- Smith, B. (2007). Ontología. En G. Hurtado y O. Nudler (Coods.), *El mobiliario del mundo. Ensayos de ontología y metafísica*. México: UNAM, pp. 47-71.
- Sola Morales Pau (2003). “GENÉTICO versus GENERATIVO, o de la generación automática de formas. Architecture, Information, Complexity
<https://psolam.wordpress.com/2013/04/27/genetico-vs-generativo-de-la-generacion-automatica-de-formas>

- Soriano, Federico. (2008). "Algunas definiciones de la palabra "diagrama". Recuperado en: <http://textosenlinea.blogspot.com/2008/09/federico-soriano-algunas-definiciones.html>
- Soto González, M. (1999) *Edgar Morin, Complejidad y sujeto humano*. [Tesis Doctoral Valladolid, España Universidad de Valladolid].
- Spinadel, V (2003). *Del número de oro al caos*. Buenos Aires: Nobuko.
- Sullivan, L. (1979). *Kindergarten Chats and other writings*, Nueva York: Dover Publications.
- Strohman, R. C. (1995). Linear Genetics, Non-Linear Epigenetics: Complementary Approaches To Understanding Complex Diseases. *Integrative Physiological & Behavioral Science*, Vol. 30 núm. 4.
- Strobl, W. (2007). *El Principio de Complementariedad y su significación científico-filosófica*. Servicio de Publicaciones de Navarra. España.
- Tatarkiewicz, W. (1997). *Historia de seis ideas*. Editorial Tecnos.
- Tomasini, C. (2005). "Las proporciones en la Catedral de Chartres". Recuperado en: <http://www.filomusica.com/filo65/chartres.html>
- D'Arcy, Th. (1980 [1917]). *Sobre el crecimiento y la forma*. Madrid: Blume Ediciones.
- Toscano, S. (2013). "Formulación de lenguaje y Geometría de regla y compás", *Revista Corazonada*, Buenos Aires, pp. 68-75.
- Toscano, S. (2018). "Arquitectura y Modelos Científicos Vigentes". *Actas de las Jornadas de Investigación. FADU/UBA*. Recuperado en: <https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/573>
- Tzonis, A. (1986). *Classical Architecture. The Poetics of Order*, Massachusetts of Technology Cambridge.
- Tzonis, A. & Lefaivre, L. (1984). La mecanización de la arquitectura y la doctrina funcionalista. *Arquitectura, técnica y naturaleza en el ocaso de la modernidad*, [Monografías de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo], Madrid, pp.27-56.
- Van de Ven, C. (1981). *El espacio en arquitectura. La evolución de una idea nueva en la teoría e historia de los movimientos modernos*. Madrid: Editorial Cátedra D.L.
- Van Berkel, B. Bos, C. (2010). Diagrams. En: Garcia, M., ed. *The Diagrams of Architecture*. London: John Wiley & Sons.
- Van der Maas, S. (2011). *El diagrama en la arquitectura*. Recuperado en: <https://docplayer.es/47225910-El-diagrama-en-la-arquitectura.html>
- Von Wright, G. H. (1979). *Explicación y Comprensión*. Madrid: Alianza Universidad.

- Von Simson, O. (1956). *La catedral Gótica*. Nueva York: Bollingen Foundation Inc.
- Von Wright, G. H. (1979). *Explicación y comprensión*. Madrid: Alianza Universidad.
- Wagensberg, J. (1985). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets.
- Walter M. F. (2012). *Cálculo en Varias Variables*. Escuela de Matemática, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado en <http://galois.azc.uam.mx>
- Wiener, N. (1988). *Cibernética y sociedad*. Buenos Aires: Editorial Sudamericana.
- Wight, F. L. (1961). *Testamento*. Buenos Aires, Argentina: Compañía General Fabril Editora.
- Wittkower, R. (1949). *Architectural principles in the Age of Humanism*. London: Warburg Institute, University of London.
- Wittkower, R. (1958). *La Arquitectura en la edad del Humanismo* (Colección Historia de la Arquitectura). Ed. Nueva Visión. Recuperado en: <https://arqnmhistoria.files.wordpress.com>
- Wittkower, R. (1995). *Los fundamentos de la arquitectura en la Edad del Humanismo*. Madrid: Alianza Forma.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge.
- Zaera-Polo, A. (1997). Una conversación con Peter Eisenman. *El Croquis*, N° 83, ed. El Croquis, Madrid-España.
- Zevi, B. (2004), *Saber ver la arquitectura*. Barcelona: Apóstrofe.
- Zienkiewicz, O., Taylor, R. (2000). "Finite Element Method". Vol. 3, Butterworth-Heinemann College (ed.).