

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

Tesis Doctoral

**Morphing Arquitectónico:
transformaciones entre las casas
Usonianas de Frank Lloyd Wright**

Autor

Arq. Rodrigo Herrera Velazco

Director

Dr. Arq. Ernest Redondo Domínguez

**Universidad Politécnica de Cataluña
BARCELONA**

**Programa de Doctorado
COMUNICACIÓN VISUAL EN ARQUITECTURA Y DISEÑO
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona**

Barcelona, Noviembre 2011

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña

Volumen único



5.- MORPHING CASAS USONIANAS.

Una vez estudiadas las casas Usonianas en el capítulo anterior, el presente capítulo se centra en el entendimiento del desarrollo de un morphing a través del caso práctico de las casas Usonianas. En este sentido, los alcances desarrollados son aplicables tanto para el caso de un morphing arquitectónico en general, como para el caso del morphing de las Usonianas en particular. Así, aunque pueda parecer que se habla en un sentido genérico, mucho de lo expuesto en este capítulo tiene sus bases en la experimentación con las casas Usonianas.

Este capítulo refleja la estructura de análisis que se debe seguir a la hora de realizar un morphing para arquitectura. Principalmente desarrolla una metodología centrada en áreas como la geometría, la topología, la arquitectura, la gráfica-informática, entre otras; donde se necesitan nociones que permitan obtener un entendimiento de la forma arquitectónica para su posterior transformación de manera óptima. Tomando en cuenta estas áreas como conjunto, el capítulo se desarrolla en siete apartados.

En primer lugar, para entender un proceso de transformación entre diferentes objetos hay que determinar qué se va a mezclar. Para ello, es importante dar con una metodología que facilite el entendimiento de esta elección. En este sentido, la ordenación y clasificación de los modelos que puedan participar en esta transformación facilita el procedimiento. Esto se ejemplifica a través de una reseña histórica (Durand), permitiendo detectar ciertas correspondencias con procedimientos y reflexiones arquitectónicos pasados. Asimismo, es destacable la línea

histórica de un postulado funcionalista que se prolonga hasta Wright. Éste en parte, determina la operatoria y validez de un proceso de transformación arquitectónico al relacionar la forma con la función en un morphing.

En segundo lugar, se trata la conformación de un modelo. El estudio preliminar de la planta de arquitectura permite comparar el programa compositivo, con el fin de asimilar la disposición de la volumetría que posteriormente será utilizada para la correspondencia entre los volúmenes de los distintos proyectos. El siguiente paso es la construcción de un modelo. Esto se realiza mediante el traspaso de datos del modelo real (planta, alzados, secciones, vistas, etc) hacia un modelo volumétrico virtual. En este punto es importante identificar los elementos característicos que conforman la arquitectura del proyecto en estudio.

En tercer lugar y una vez que se tiene el modelo virtual finalizado, se realiza un análisis de tipo topológico. Este examen topológico no da cuenta de la forma sino del número de aberturas y conexiones que tiene el objeto. Una transformación topológica sólo se preocupa de esa estructura relacional (aberturas y conexiones). En el caso de romper esa estructura relacional cuando se realiza una transformación, pasa a llamarse una evolución topológica porque es necesario realizar una operación de cirugía topológica. Por último, el objeto modelado en un ambiente gráfico, no siempre presenta la topología que se observa en las imágenes representadas. Los objetos gráficos pueden simular otro tipo de topología según las particularidades del programa informático que se utiliza.

En cuarto lugar, se expone la importancia del grado de control para definir el proceso de transformación determinado por el usuario. Dejando de lado el automatismo que regula la correspondencia en una transformación, el procedimiento del morphing permite crear formas claves para definir las transiciones por las que pasará la forma. Las formas claves pueden ser definidas mediante el mapeado de puntos, que al asignar la posición geométrica que tendrán los puntos, permiten guiar los distintos estados que adopta un objeto durante un morphing.

En el quinto lugar, se plantea la estrategia de transformación como guía para dirigir las disposiciones dadas por el usuario para determinar el morphing. Se trata de la definición de todas las acciones que se van a realizar en la forma con el fin de dar un marco global de actuación, considerando las acciones problemáticas que puedan implicar cualquier tipo de modificación significativa de la forma en el proceso. En la estrategia además, se debe tener en cuenta la temporalidad del proceso, de manera que los cambios sucedan de forma paulatina. Una vez considerados estos dos puntos (cambios significativos y temporalidad), hay que considerar que la estrategia puede variar desde una primera propuesta global, reprogramando la posición y sincronización de los cambios significativos.

En sexto lugar, se explica el resultado final que se obtiene de un morphing: una animación que es el registro de toda la secuencia de transformación. Además, existen otros tipos de registros. Por un lado, las instancias que se obtienen en un determinado tiempo y que corresponden a imágenes que forman parte de la secuencia de animación. Por otro lado, existe otro registro de carácter formal, que consiste en los diferentes estados de la forma durante la transformación, los cuales pueden ser extraídos a lo largo de toda la secuencia. Por último, se pueden obtener otros modelos transitorios entre las dos formas originarias, al manipular el grado de transición de cada elemento en forma independiente. Este último caso, permite configurar un modelo híbrido fuera de la

secuencia lineal de la animación.

En séptimo lugar y para finalizar el capítulo, se describen una serie de pautas y directrices que son necesarias para realizar un buen morphing (óptimo). Estos parámetros y principios son entendidos como una guía para obtener transformaciones más naturales y resultados arquitectónicos satisfactorios.

5.1. El entendimiento de las combinaciones arquitectónicas.

En este apartado se desarrollan diferentes temáticas relacionadas con la lógica de un procedimiento de combinación, entendida como la unión de dos elementos en un mismo sujeto (híbrido). Se comienza exponiendo que a la hora de realizar un morphing tanto genérico como arquitectónico, se debe tener claro **qué se va a mezclar**. Para ilustrar este tema se toma como ejemplo el caso de especies híbridas, especificando un caso particular de híbridos⁽¹⁾ de la especie animal e híbridos ficticios, para realizar una analogía con el tema del morphing. Posteriormente, se trata la importancia de una **metodología** de ordenación y clasificación, que permita la elección conveniente de qué mezclar. Se realiza una referencia histórica respecto a analogías que se han detectado en procedimientos del pasado y que marcan una conexión de los postulados funcionalistas, llegando hasta el caso de Wright. Para finalizar, se ejemplifica la **correspondencia funcional** que existe en algunas obras habitacionales de Wright, con el fin de mostrar el paralelismo existente entre el procedimiento creativo de su obra y la operativa funcional del morphing.

En los grandes felinos el género *Panthera*⁽²⁾ incluye a cuatro especies vivas: *Panthera leo* (león), *Panthera onca* (jaguar), *Panthera pardus* (leopardo), *Panthera tigris* (tigre). Las combinaciones que se obtienen en el cruce de estas especies dan lugar a híbridos, que dependen de las características que traspasan los progenitores. Dentro de estas especies híbridas se encuentran: el **leopón** (híbrido del cruce entre un leopardo y una leona), el **ligre** (león y tigresa), el **tigón** o **tigrón** (tigre y leona).

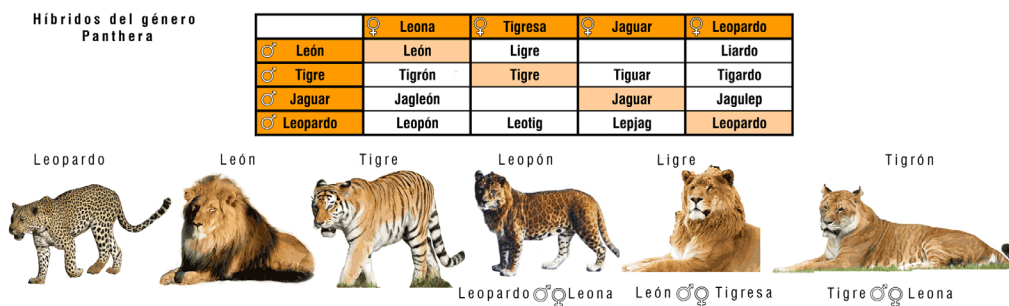


Fig 1. Híbridos del género *Panthera*.

A todos estos casos de **hibridación** se les asigna un nombre siguiendo una convención. Así, para componer el nombre se utilizan dos vocablos. En primer lugar, se utiliza una parte del nombre que corresponde a la especie paterna, añadiéndole una segunda parte correspondiente al nombre de la especie materna. Estos vocablos se juntan y forman el nombre del nuevo espécimen.

Por otra parte, continuando con esta misma analogía, se pueden encontrar en otro nivel de clasificación los

(1) Un híbrido en biología es un organismo vivo animal o vegetal procedente del cruce de dos organismos de razas, especies o subespecies distintas, o de alguna o más cualidades diferentes.

(2) *Panthera* es un género de mamíferos de la familia *Felidae*, compuesta por cuatro especies muy conocidas: el tigre, el león, el leopardo y el jaguar. El género comprende aproximadamente la mitad de los grandes félidos. Solamente estas cuatro especies tienen las estructuras anatómicas que les permiten rugir, debido a una modificación de la forma de su hueso hioides.

híbridos ficticios. Estos son otro tipo de animales que combinan rasgos de león con otro tipo de animales, creando especies imposibles. Son criaturas mitológicas creadas por el hombre. Por ejemplo, la **esfinge** era un ser mitológico representado con rostro de mujer, cuerpo de león y alas de ave. Otro ejemplo era el **grifo**, criatura cuya parte superior era el cuerpo de un águila gigante, con plumas, pico y garras; mientras que su parte inferior era la de un león. Otra criatura mitológica era la **mantícora**, un ser con cabeza humana, barba y densa cabellera. Las alas eran las de un murciélago y el resto de su cuerpo era la de un león gigante, con cola de un dragón o escorpión. Para terminar estaba la **quimera**, monstruo de la mitología griega que tenía tres cabezas: una de león, una de cabra y una de dragón (o culebra), que salía de su cola.

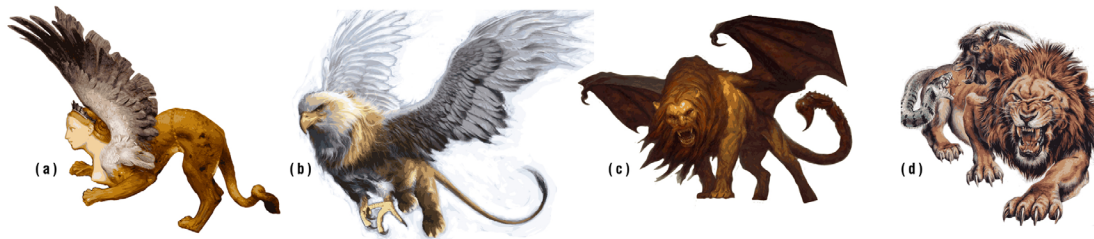


Fig 2. Criaturas mitológicas creadas por el hombre: (a) Esfinge, (b) Grifo, (c) Mantícora y (d) Quimera.

Los ejemplos anteriores no tratan en absoluto sobre arquitectura, pero sirven para entender entre qué posibles alternativas puede optar un usuario a la hora de decidir qué mezclar. Se trataría de determinar el grado de relación que tendrán los modelos a mezclar: en el primer ejemplo, se mezclan especies del mismo género, mientras que en el segundo ejemplo, no. Así, desde el punto de vista de la taxonomía⁽³⁾ biológica el primer caso mezcla elementos muy cercanos entre sí, en tanto que en el segundo caso estarían rondando la fantasía extrema.

Además, otra diferencia aplicable a los dos casos anteriores, es el “nivel de hibridación” del resultado. Se entiende como nivel de hibridación al grado de combinación que recibe el híbrido procedente del cruce de sus predecesores. En el primer caso, los híbridos manifiestan una combinación de características que presentan una identidad propia, sin que sean claramente identificables las aportaciones de sus predecesores. Este carácter autónomo con que se beneficia cada híbrido puede ser similar al desarrollado en una operatoria de morphing. En el segundo caso, la identidad de cada híbrido manifiesta una conformación basada en una sumatoria de partes de sus predecesores. Esta identidad es propia de las técnicas de composición tipo collage o montaje.

Tanto en un morphing genérico como en uno para arquitectura, se puede mezclar cualquier objeto con el que se pueda hacer un modelo gráfico tridimensional. Sin embargo, es importante definir entre qué tipos de obras arquitectónicas es conveniente mezclar. En este sentido, una mezcla de obras de arquitectura (modelos) con un programa arquitectónico similar deberían ser viables para una combinación satisfactoria. Esto requiere algún tipo de **clasificación** de los modelos a mezclar.

En un sentido más general y siendo parte de la estrategia inicial del morphing para arquitectura, se emplea

(3) Taxonomía: Ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación. Se aplica en particular, dentro de la biología, para la ordenación jerarquizada y sistemática, con sus nombres, de los grupos de animales y de vegetales.

la clasificación como un sistema de selección y ordenación de los modelos a transformar. Esta selección en arquitectura podría estar dada por su uso o funcionalidad, centrándose en los tipos de obras arquitectónicas que son convenientes mezclar. Esta estrategia de combinación se inicia por la **clasificación de un repertorio de edificios**.

Los antecedentes históricos de este tipo de metodología clasificatoria son explicados por **Philip Steadman** en su libro sobre arquitectura y naturaleza⁽⁴⁾. En dicho libro expone cómo los avances en la biología y un mayor conocimiento en la historia natural del siglo XVIII, propiciaron que en el siglo XIX se desarrollara en la teoría de la arquitectura, movimientos análogos basados en métodos clasificatorios. Como consecuencia, aportaron una teoría constructiva transformativa de tipos arquitectónicos desarrollados a partir de arquetipos⁽⁵⁾.

De esta forma, fue **Jean Nicolas Louis Durand** en *Recueil et Parallèle des Edifices*⁽⁶⁾ (1801) quien crea una agrupación con las plantas de arquitectura de un gran número de edificios históricos según sus funciones generales (estadios, teatros, mercados, etc). Todos estos edificios estaban dibujados a la misma escala y dispuestos como un muestrario de especímenes de una colección de biología. En 1819 enseña un método de composición arquitectónica en sus *Leçons d'Architecture*⁽⁷⁾, siendo desarrollada a partir de su obra sobre el análisis clasificatorio de los tipos de edificios y su historia. El propósito que buscaba Durand se fundamentaba en el estudio de los tipos representados en sus "lecciones de arquitectura", que sumados a los principios de composición intrínsecos, permitiera a sus estudiantes poner fin a una desconcertante e interminable variedad de casos particulares sin relación entre sí. Para él era imposible entender la arquitectura desde el estudio sucesivo de todas las variedades de edificios, sumado a todas las circunstancias que pudieran modificarlos. Por ello, si el estudiante se centraba en las formas tipo generales, sería capaz de modificar esos tipos en la medida que existiera la necesidad de responder a los requerimientos particulares de su función, emplazamiento, presupuesto y condiciones especiales de cada cliente.

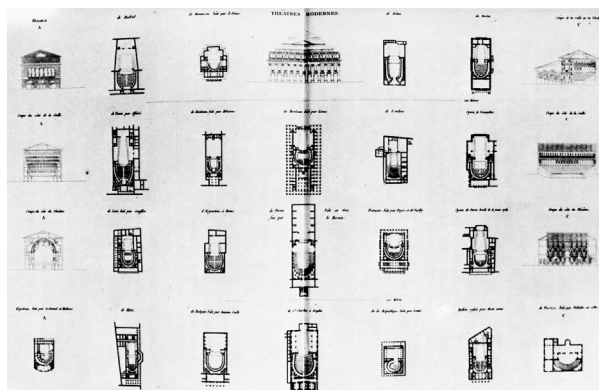


Fig 3. Jean Nicolas Louis Durand (1800). Repertorio de teatros modernos. Plantas, alzados y secciones dibujados a la misma escala.

(4) Steadman, Philip. 1982. Arquitectura y naturaleza: Las analogías biológicas en el diseño. Madrid: H. Blume.

(5) Arquetipo: Modelo original y primario en un arte u otra cosa.

(6) Durand, Jean-Nicolas-Louis. 1800. Recueil et parallèle des édifices de tout genre, anciens et modernes. Paris: S.I.

(7) Durand, Jean-Nicolas-Louis, and Rafael Moneo. 1981. Compendio de lecciones de arquitectura: Parte gráfica de los cursos de arquitectura. Madrid: Pronaos.

Lo interesante de Durand era que realizaba una clasificación de los edificios históricos desde un carácter netamente funcional. Su repertorio estaba catalogado a partir de la función general de los edificios, dando lugar a la admisión de nuevos edificios según fueran apareciendo nuevas demandas funcionales (industriales, sociales, etc). El sistema de clasificación que empleaba lo utilizaba para enseñar la composición arquitectónica de un edificio. Esta disposición obedecía a condiciones de tipo formal y geométrico.

Lo anteriormente expuesto no trata de resurgir teorías metodológicas del pasado. Precisamente, busca asimilar que en la elaboración de un proceso arquitectónico creativo resultaba obligatorio la ordenación del repertorio, además de contar con una idea de organización demarcada por un esquema clasificatorio, pudiendo obtener algunas soluciones referidas al desarrollo de una teoría compositiva.

La técnica del morphing para arquitectura no deja de ser una técnica de experimentación transformativa (no es de tipo generativa). Presenta cierta capacidad para realizar cambios, tanto en la estrategia del proceso como en los componentes de la transformación. Es por esto que la clasificación funcional de edificios realizada por Durand es un método abordable para ensayar posibles transformaciones. En el caso del morphing, la clasificación de un repertorio es utilizado para ordenar ciertas tipologías (si las hay), comparar el programa arquitectónico y por último, para poder descomponer los edificios en elementos configurativos menores, pasando de un orden mayor a uno menor (de lo general a lo particular) en la escala del proceso.

En otro orden de cosas pero volviendo a retomar a Durand y su enseñanza arquitectónica, la particularidad compositiva que proponía era el mecanismo para componer edificios racionales. Esta modalidad distintiva abordaba los dos conceptos claves en una arquitectura convencional: el **programa** y la **tipología**. El **concepto funcionalista** buscaba fijar las relaciones entre los espacios y sus usos. Por una parte, los diferentes **programas** de los edificios se traducían en diferentes distribuciones, de forma que las diferentes temáticas funcionales estaban reflejadas en una clase específica de planta. Por otra parte, las **connotaciones tipológicas** permitían la identificación de un edificio según “su funcionamiento”, pudiendo ser legible desde su apariencia. Cada nueva tipología entre las múltiples designaciones funcionales iban encontrando sus nuevas disposiciones.

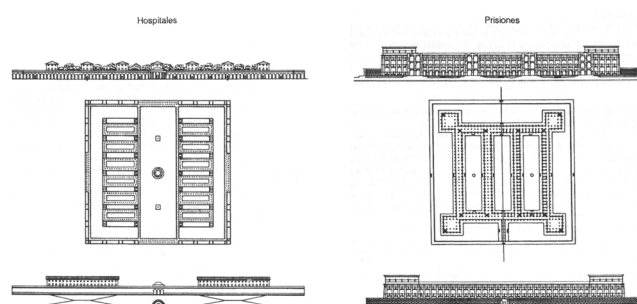


Fig 4. Jean Nicolas Louis Durand. Hospitales y prisiones. Intentos por establecer una tipología funcional (comienzos del siglo XIX).

Lo anteriormente expuesto son los antecedentes del **funcionalismo arquitectónico** del movimiento moderno, el cual dará valor a una serie de principios. Para empezar, las funciones estructurales del edificio se harán evidentes y los elementos portantes se descubrirán y exteriorizarán. Prosiguiendo con los espacios internos, los cuales proyectarán sus formas características en el contorno exterior. Finalmente, no será suficiente que

cada elemento tenga una función definida, deberá ser notoria y evidente.

Esta estética funcionalista acentuará el énfasis en lo utilitario y en el uso de una razón práctica en el diseño. Así también, asimilará una analogía con los organismos y con las máquinas⁽⁸⁾. Es importante destacar que el único vínculo biológico que parece tener una analogía con la arquitectura moderna es la relación que existe entre **forma y función**. Esta correlación se da en la conocida frase “**la forma sigue a la función**” (*form follows function*), que según Frank Lloyd Wright fue desarrollada por Louis Sullivan, basándose en los escritos de Herbert Spencer. Si bien, la frase original era “*la forma siempre sigue a la función*” (*form ever follows function*), ésta fue simplificada y menos enfática, extendiéndose y recordándose habitualmente.

Según lo comentado anteriormente, una metodología de ordenación y clasificación permitirá la elección conveniente de qué mezclar. Una vez superado este paso, la siguiente etapa sería seleccionar los elementos que tengan correspondencia funcional en el programa arquitectónico. En este sentido, el trabajo de March y Steadman⁽⁹⁾ aporta un análisis de tres casas proyectadas por Frank Lloyd Wright mediante el estudio gráfico de las tres plantas arquitectónicas. Así, logran sintetizar la información programática de estas tres casas en un solo **grafo**⁽¹⁰⁾. Aunque el diseño formal de cada una de estas casas era muy distinto y cada uno de los edificios tenía una marcada individualidad, derivada de sus formas cuadradas, circulares y triangulares; el repertorio formal tan variado en el diseño de las casas por parte de Wright tenía como base la misma estructura programática subyacente. De esta manera, a partir del programa de cada una de las casas se obtiene un diagrama casi idéntico para ellas.

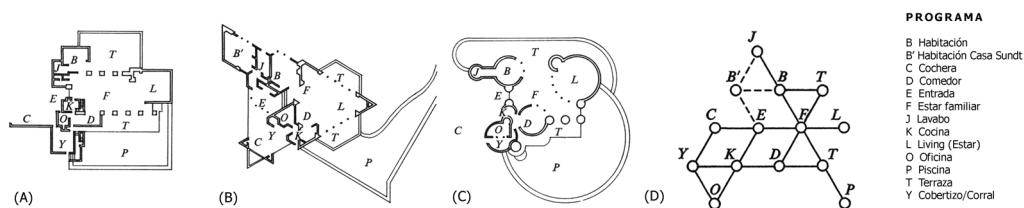


Fig 5. Comparativa de tres plantas pertenecientes F. Ll. Wright. **(A)** Life House, 1938. **(B)** Vigo Sundt House, 1941. **(C)** Ralph Jester House, 1938. **(D)** Grafo de las tres casas.

A lo largo de este apartado se han dado los argumentos metodológicos para ordenar y clasificar los modelos que se utilizarán en una transformación. Adicionalmente, los elementos que definen los modelos se basarán en el programa arquitectónico para mantener una correlación entre ellos. De este modo, el ejemplo de Wright demuestra que de forma inversa, si se tiene un programa arquitectónico definido y que es común a los modelos que se van a mezclar, la forma que los define puede ser independiente a cada uno de los modelos. De esta

(8) Ver: Collins, Peter. 1981. Los ideales de la arquitectura moderna: Su evolución (1750-1950). 5ª ed. Barcelona: G. Gili.

(9) March, Lionel, and Philip Steadman. 1974. The geometry of environment: An introduction to spatial organization in design. Cambridge: M.I.T. Press. pp. 27-28.

(10) La planta de arquitectura de un edificio puede ser representada como el diagrama de un grafo. Este tipo de representación permite estudiar las interrelaciones entre unidades espaciales que interactúan unas con otras. Un grafo se representa como un conjunto de puntos (vértices o nodos) unidos por líneas. Su aplicación consiste en definir un vértice para cada espacio funcional de la planta de arquitectura. Cuando existe alguna conexión espacial a través de un acceso directo entre habitaciones o mediante una puerta o abertura, los vértices que representan a los espacios se interconectan por medio de una línea. La información que entrega es una simplificación programática de la estructura subyacente de la planta, junto con la relación entre las habitaciones de un edificio sin necesidad de especificar en detalle la forma del recinto.

forma y volviendo a la metodología original, una transformación (morphing) entre modelos de igual tipo o función que tengan una correspondencia programática será también válida para modelos con distinta forma.

5.2. Configuración del modelo.

Como punto de partida para realizar una transformación arquitectónica, es necesario obtener un análisis de la forma y su visualización, con el fin de lograr su representación virtual. Esta práctica permite realizar una **simulación**, que consiste en el proceso de diseñar un modelo desde la realidad y llevar a término experiencias con él en un entorno virtual. Estos **modelos de representación** permiten modelar edificios o formas reales por medio de programas de ordenador, los cuales hacen uso de variables temporales que tienen relación con el movimiento, las deformaciones y transformaciones. En el caso del morphing, las acciones que se llevan a cabo con el modelo de representación consisten en experimentos de transformación formal. Estas comprobaciones y ensayos nunca podrán ser llevados a término en la realidad, ya que son experimentos ficticios. El morphing es un proceso artificial, así como también sus leyes de manipulación. Esta especie de alquimia formal permite lograr una correspondencia entre entidades frecuentemente inconexas, las cuales se transforman mediante una simulación gráfica de una interpolación matemática.

Este mecanismo formal (morphing) presenta un atractivo por ser un procedimiento desconocido. El poder crear y manipular objetos arquitectónicos híbridos requiere la cooperación no sólo de la herramienta informática, sino también de la intuición y percepción arquitectónica del operador (usuario). Son dos “juicios”: el informático y el humano. Ambos criterios permiten el cruce de dos elementos diferentes que dan como producto (en el caso más favorable) una combinación de un objeto híbrido con las mejores cualidades de ambos elementos originarios. Estos objetos híbridos están basados en configuraciones con una gran carga de conocimiento arquitectónico y están disponibles para la experimentación, el análisis y la retroalimentación de sus configuraciones. Este diseño híbrido es una propuesta a un diseño gradual, que comienza con sus componentes primarios y que se puede concadenar en una complejidad mayor. Pero también, se puede comenzar con modelos de cierta complejidad e ir comparándolos y transformándolos entre ellos, con el fin de ir estableciendo nuevas condiciones o configuraciones en el diseño que se está probando. Además, se puede ir evolucionando desde un diseño a otro, explorando las implicaciones que tienen las distintas posturas formales en el diseño del proyecto.

Por último, cabe destacar que la técnica del morphing es una aplicación que permite transformar una forma en cualquier otra. Es importante distinguir que para efectuar estas transformaciones entre formas arquitectónicas, se deben reconocer ciertas lógicas que tienen relación con el diseño arquitectónico y la especificación de elementos configurativos de la arquitectura.

5.2.1. Análisis Planimétrico.

Dentro del análisis que se debe realizar para crear una metodología de ordenación y clasificación de los modelos a transformar, el análisis de la planta arquitectónica entre obras de arquitectura a mezclar, permite visualizar y determinar los elementos volumétricos que tendrán una correspondencia funcional entre los programas arquitectónicos de ambas obras. Es así como el análisis de la planta busca encontrar espacios o zonas comunes identificables entre los modelos a transformar. El procedimiento para sintetizar la estructura

programática de los proyectos consiste en modelar los elementos o volúmenes, analizando y agrupando cada uno de los elementos, espacios y conjuntos de espacios (zonas); según el número de interrelaciones posibles entre elementos análogos. La existencia e identificación de las relaciones entre los programas arquitectónicos y las volumetrías que lo conforman, generan una **correspondencia de dependencias recíprocas**, convirtiéndose en la estructura y organización de los **principios funcionales** para la transformación de la forma arquitectónica.

Es importante situar dentro de la planta cuál será el centro u origen de cada uno de los modelos a transformar, con el fin de superponer ambos centros y de esta forma, equilibrar las distancias entre la ubicación de cada modelo. De este modo, se logra que cuando se realizan las transformaciones, los objetos no recorran un extenso trayecto para desarrollar su transición. En este sentido, la determinación de un centro del modelo puede estar determinado mediante el **centroide**⁽¹¹⁾ de todas las figuras de la planta. En el caso de las Usonianas, la posición del centroide de la chimenea era un buen punto de origen para la transformación. Cabe recordar que si tuviéramos los dos modelos a transformar conjuntamente en la posición para ser transformados, estos dos modelos estarían superpuestos y sus centroides a una distancia cercana.

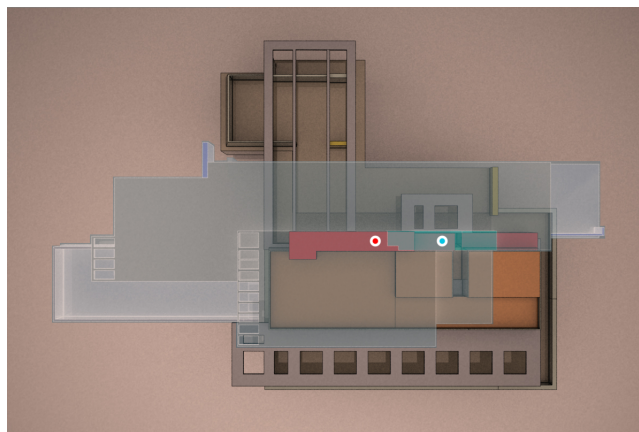


Fig 6. Vista superior con los modelos superpuestos de la casa Sturges y Goestch Winckler en la posición de inicio y final del proceso de morphing. En ambos modelos se marca el centro del modelo que coincide con la posición central de la chimenea.

El uso de los puntos cardinales, específicamente del norte y del sur, no es una condicionante para orientar el modelo. Esto se debe a que en una transformación el sentido y dirección con que se distribuyen los recintos programáticos, determina el criterio a seguir para posicionar los modelos a transformar. De hecho, es preferible que las geometrías de los modelos estén alineadas desde un principio, a que en el proceso de transformación una de ellas tenga que realizar una rotación adicional para alinearse con la otra.

5.2.2. Morfología.

Las interrogantes respecto a la forma en la transformación de modelos arquitectónicos, no son sólo relativas a las áreas de la geometría y la topología, sino también de la función, la composición, la ordenación y la representación, entre otras. Comenzar a definir el concepto de la forma arquitectónica, no es el propósito de

(11) El centroide es un punto que define el centro geométrico de un objeto.

esta tesis. Sin embargo, validar algunos conceptos referidos a la noción de forma, permitirá profundizar un posicionamiento frente al análisis morfológico en un problema de transformación formal.

La palabra **forma** está relacionada con el aspecto externo de una figura y ésta se establece según ciertos límites o propiedades perceptibles, que la configuran como algo determinado. Al hablar de la forma con respecto a su configuración, se ponen de manifiesto ciertos rasgos concretos y determinados que hacen la distinción de su aspecto y estructuración. Aunque esta configuración esté identificada con una unidad, también denota que está formada por partes o elementos, ordenados de tal manera que forman una totalidad.

La **noción de forma** presenta una dualidad en la estructuración de su apariencia. Esta ambivalencia se debe a la relatividad con que se caracteriza tanto a nivel volumétrico como espacial. La forma arquitectónica presenta esta doble estructuración definida por la materia y por el espacio, siendo la analogía arquitectónica de estos aspectos estructurales el lleno y el vacío⁽¹²⁾. De la misma forma esta ambivalencia también se aprecia en un morphing. Por un lado, la transformación del modelo desde una visión global, permite apreciar el modelo desde un punto de vista volumétrico. Por otro lado, gracias a las técnicas actuales, se pueden situar cámaras al interior del modelo, que posibilitan fijar la atención en la espacialidad del modelo en transformación, desde un punto de vista más parcial.

A una forma en un morphing es posible relacionar un concepto o cualidad que genere una dependencia con ella. Asimismo, en un morphing para arquitectura la metodología para clasificar y ordenar los modelos a mezclar busca una cualidad funcional que genere la dependencia con la forma. Junto con lo anterior, el hecho de ser una forma gráfica que va a ser transformada implica una concepción estructural de la forma. Esta estructura está definida principalmente por la geometría y su conectividad expresada a través de la topología del objeto gráfico. Se debe tomar en cuenta que en un morphing la forma mantiene siempre relaciones de referencia con otra forma. Debido a esta relación de referencia, ambas formas conservarán a lo largo de todo el proceso de transformación una **dependencia de tipo funcional y estructural**.

En una transformación entre dos modelos es recomendable valorar su similitud en base a diferentes factores: **la escala, la dimensión y la alineación de los modelos**.

En lo referente a **la escala**, como condición los modelos deben estar en una misma escala gráfica (modelados con la misma unidad gráfica). No tiene sentido mezclar dos modelos con diferente escala gráfica.

Respecto a **la dimensión**, tiene que existir un equilibrio entre la volumetría de los modelos a transformar, con el fin de evitar grandes expansiones o contracciones de la forma.

Para finalizar, se encuentra **la alineación** entre modelos. De la misma forma en que desde el punto de vista planimétrico es importante superponer el centroide de las formas a transformar, desde el punto de vista volumétrico pasa algo similar con el centro de masa⁽¹³⁾. En este sentido, los centros de masas de los modelos

(12) Montes Serrano, Carlos. 1992. Representación y análisis formal: Lecciones de análisis de formas. Valladolid: Universidad. Secretariado de Publicaciones.

(13) El centro de masa es el punto en el cual se puede considerar concentrada toda la masa de un objeto o de un sistema, para estudiar determinados aspectos de su movimiento.

deberían estar cercanos entre sí para que el desplazamiento durante la transformación sea mínimo. Además, los centros de masa deberían compartir en la medida de lo posible el mismo eje vertical (eje Z). Este hecho supondría que los centroides estarían superpuestos en el caso planimétrico. Por último, se debería tener en cuenta que para evitar posibles rotaciones en la transformación de los modelos (principalmente prismas rectos), los sistemas de coordenadas implícitos en cada modelo deberían estar alineados entre sí.

5.2.3. Elementos formales: del modelo arquitectónico al modelo gráfico.

Para la elaboración de un modelo gráfico obtenido a partir de una obra de arquitectura es necesario separar las diversas partes que conforman la obra arquitectónica a transformar, para ser traspasada a un entorno virtual configurado por elementos gráficos. En este sentido, existen varios autores que hablan sobre el tema de la constitución y sus componentes referidos como una forma analítica de descomposición morfológica de la obra arquitectónica.

Christian Norberg-Schulz⁽¹⁴⁾ habla sobre un método en el cual descompone la forma arquitectónica basándose en un análisis de tipo estructural, enumerando los elementos y las relaciones que determinan la totalidad formal. Según él, los elementos son unidades características que forman parte de una forma arquitectónica y pueden ser medibles. Las principales categorías para una clasificación de los elementos arquitectónicos se basan en tres nociones: **masa, espacio y superficie**.

La masa denota todo cuerpo tridimensional, mientras que **el espacio** denota un volumen definido por las superficies límite de las masas que lo rodean. Por último, **la superficie** tiene la capacidad de ser límite de la masa y del espacio. Los “elementos masa” desde el punto de vista arquitectónico, están representados por cuerpos que pueden ser aislados de su entorno, de tal forma que es posible describir y configurar su dimensión mediante un sistema de coordenadas u otro sistema afín.

Los autores del libro “Forma y deformación”⁽¹⁵⁾ utilizan como base a Norberg-Schulz. Para ellos, la noción de elemento formal está caracterizado por un estado de equilibrio, representado de manera particular entre el espacio y la materia. Realizan una clasificación esquemática de elementos divididos en tres categorías: **elementos lineales, elementos planimétricos y elementos volumétricos**.

Los elementos lineales se caracterizan por una organización donde la materia se reduce a una continuidad lineal, concentrándose al máximo y tomando funciones estructurales. **Los elementos planimétricos** concentran la materia en un plano, de forma que el componente tridimensional es mínimo, reduciéndose a un diálogo entre cerramiento y cubierta. Por último, **los elementos volumétricos** desarrollan la materia en una continuidad tridimensional definida por relaciones entre volúmenes. Asimismo, la relación entre el interior y el exterior es fronteriza, diferenciando claramente el dentro del fuera.

(14) Norberg-Schulz, Christian. 2001. Intenciones en arquitectura. GG reprints. 3ª ed. Barcelona: G. Gili.

(15) Borie, Alain, Pierre Micheloni, and Pierre Pinon. 2008. Forma y deformación de los objetos arquitectónicos y urbanos. Estudios universitarios de arquitectura. Vol. 15. Barcelona: Reverté.

El análisis de la obra arquitectónica a través de vistas, plantas, alzados, secciones o incluso un modelo tridimensional; permite descomponer el conjunto global del proyecto, separándolo e identificándolo en partes elementales autónomas. Además, el modelo para ser representado puede provenir no sólo de una obra realizada, sino también de una obra que está en fase de diseño.

El modelado de los elementos tridimensionales exige al usuario una comprensión precisa de las características geométricas y topológicas de cada elemento para crearlo correctamente. La realización de un modelo de representación gráfico abre un abanico de diferentes métodos para la construcción (virtual) de cada componente tridimensional. El modelador elegirá el método para la realización de los elementos geométricos complejos, a través de una serie de operaciones que dependerán del programa y la técnica de modelado elegida. Un modelo gráfico se construye a partir de variados elementos para simular las transformaciones que se llevarán a cabo entre ellos. Su finalidad es comprender el comportamiento de los elementos formales dentro de un sistema o simplemente, evaluar nuevas estrategias de transformación variando los criterios de topología, geometría, funcionalidad, etc. La construcción de un modelo tridimensional mediante programas informáticos es un proceso riguroso y preciso. El ordenador es una máquina que recibe y procesa datos para convertirlos en información, por lo tanto, necesita datos exactos y no aproximados.

Para comenzar el proceso de modelado se fija un **nivel de especificación** para el modelo. Así, el operador modela los elementos tridimensionales, decidiendo qué grado de detalle utilizará cuando modele un componente en particular. Esto permite excluir del modelado las partes que no se requieren para la simulación del proyecto formal, restringiendo así el nivel de detalle con el que trabajar. Lo importante es especificar el modelo según el grado de complejidad con el cual se quiere elaborar el morphing. El análisis comienza descomponiendo lo general hacia lo particular, con el fin de elaborar y desarrollar un modelo de trabajo con una disposición global entre los **elementos compositivos** y la volumetría del programa arquitectónico.

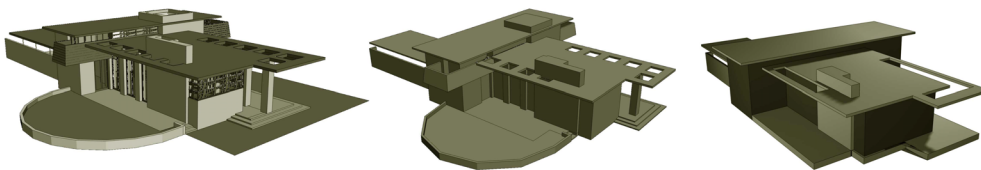


Fig 7. Modelos de la casa Gordon con distintos niveles de especificación en el modelado. Tres modelos con un nivel de detalle alto, medio y bajo.

Es primordial modelar de forma conjunta los modelos representativos de cada obra elegida para el morphing. Es decir, la construcción de los dos modelos que intervienen en la operatoria del morphing debe ser realizada en forma paralela, con el fin de establecer en la medida de lo posible **parejas de elementos comunes**. Esta relación bilateral se establece desde el modelo inicial hacia el modelo final, siguiendo una estrategia. Esta estrategia consiste en identificar los elementos y agruparlos según el tipo de reciprocidad que tenga con los elementos del otro modelo. Una primera agrupación consistirá en aquellos elementos volumétricos con una cualidad funcional, que tienen un elemento correspondiente en el otro modelo. En un segundo grupo se encontrarán los elementos identificados por sus características constitutivas (cubierta, muro, escalera,

etc), que también tengan un elemento correspondiente. Un tercer grupo será para aquellos elementos que no están incluidos en los anteriores. Como cualquier elemento de este último grupo en principio no posee un elemento correspondiente, se debería localizar un elemento recíproco siguiendo un criterio de intencionalidad arquitectónica determinado por el usuario.

En el caso particular del modelado con sólidos, los programas presentan frecuentemente una serie de sólidos geométricos básicos que pueden ser utilizados para construir estructuras tridimensionales de mayor complejidad. Mediante el ensamble de elementos o de operaciones booleanas, se pueden ir definiendo nuevos elementos a través de la intersección o unión de dos o más sólidos. Cualquier **sistema de representación de sólidos** basado en ciertas propiedades matemáticas es un método para capturar información, organizando los mismos datos geométricos y topológicos en forma de una estructura de datos. Todos los sistemas de representación gráfica están organizados en términos de un número finito de operaciones en un conjunto de primitivas. Por lo tanto, el espacio de modelado de cualquier representación particular es finito y cualquier sistema de representación aislado no es suficiente para representar todos los tipos de sólidos. Por ejemplo, los sólidos definidos a través de combinaciones entre operaciones booleanas regulares, no pueden ser representados de la misma forma que con el barrido de una primitiva en movimiento de acuerdo a una trayectoria en el espacio, a no ser que sean casos muy sencillos. Esto obliga a los modernos sistemas de modelado geométrico a mantener variados métodos de representación de sólidos, además de facilitar la conversión eficiente entre los sistemas de representación gráfica.

El resultado de todo este proceso de modelado es un modelo tridimensional del proyecto que está bajo estudio. El modelo total se obtiene individualizando cada uno de los componentes y ensamblando cada una de las partes. Una vez que el modelo ha sido montado, se puede alterar la información volumétrica o modificar las relaciones usando herramientas que al modificar los parámetros impuestos previamente (posición, material, color, etc), muestran los resultados y permiten la simulación.



Fig 8. Secuencias de transformación con los distintos grupos de elementos configurativos del modelo.

5.3. Topología.

5.3.1. Análisis de formas a través de la topología.

La **Topología** es una rama de las matemáticas que estudia aquellas propiedades cualitativas intrínsecas de las formas. El interés de la topología está centrado en la forma como algo cambiante, dejando de lado lo geométrico y la forma concreta de los objetos. Se refiere directamente a las relaciones que se dan o producen entre elementos, como es el caso de las curvas en general, junto con las formas y contornos de superficie sin importar la suavidad y rugosidad de estos. Sobre todo, se centra en describir la manera en que los objetos geométricos están **conectados**. Es decir, la topología que se desarrolla en el contorno de la forma está especificada por la **conectividad** de su superficie. Esta forma que también es frontera, incluye las **superficies cerradas** (compactas y sin bordes), que son aquellas que encierran un volumen en el espacio tridimensional y no poseen curvas que la limiten. En este tipo de superficies, se puede ir desde cualquier punto de ella en cualquier dirección y siempre permanecer en su superficie. Algunos ejemplos de este tipo son el toro o una esfera, incluyendo cualquier deformación de ambos.

A nivel conceptual, se podría catalogar a la topología como una **“geometría cualitativa”** que tiene relación con la **“proximidad”** o la **“posición relativa”** entre puntos. Esta disciplina deja a un lado las **nociones cuantitativas** como la posiciones dadas por las coordenadas, la longitud, los ángulos, el área, el volumen, etc; propias de la geometría clásica. Es decir, todas las características que se pueden medir. Sin embargo, la topología se centra con mayor énfasis en **nociones cualitativas** como por ejemplo, si la forma tiene o no agujeros, si tiene bordes o si se puede dividir en componentes conexos, etc. Así, la información topológica tiene relación con valores geométricos que se cuentan, pero no se miden. Matemáticamente, la topología se describe mediante números enteros y la geometría métrica con números reales.

Es importante señalar que a nivel técnico, el término topología tiene un significado aplicable a distintos niveles formales. Por una parte, se refiere al espacio topológico global subyacente, determinado principalmente por las aberturas y continuidades de la forma. Éstos están constituidos por la totalidad del conjunto de elementos (puntos, líneas, curvas, etc) de la superficie del objeto. Por otra parte, se refiere a la estructura formal dada por una subdivisión específica, es decir, la red vértice/arista/cara de un objeto dado, determinados por sus conexiones y límites. Sin embargo, generalmente no se especifica a cual de ellos se refiere.

Tomando como ejemplo un **poliedro**, se puede observar que la topología del poliedro está referida a la vinculación **vértice/arista/cara**. Estas caras poligonales presentan una disposición donde sólo dos polígonos se encuentran en cada arista y cada vértice es adyacente a por lo menos tres aristas. Además, es posible recorrer la superficie del poliedro atravesando sus aristas y moviéndose desde una cara poligonal a otra, hasta que todos los polígonos han sido transitados mediante un recorrido continuo.

Retomando el concepto de **conectividad**, se define como el número máximo de anillas cerradas necesarias para dividir la forma en partes distintas. Por ejemplo, un cubo es de una conexión, mientras que un toro es de

dos conexiones. Así, un **poliedro simple**⁽¹⁶⁾ (no tiene agujeros) es un poliedro con una **conexión**, donde todas las caras son planas y están conectadas. Por otra parte, una cara poligonal que tiene una frontera consistente en una sola curva es de una conexión, mientras que una cara poligonal con un agujero, es decir, dos curvas de borde (una interior y otra exterior), es de dos conexiones.

Una vez desarrollada la topología a nivel conceptual, se procede a profundizar en el nivel estructural. En este sentido, cabe destacar que la nomenclatura que se utiliza entre una disciplina y otra puede variar. Utilizando como ejemplo los poliedros, que son formas utilizadas generalmente en arquitectura, la nomenclatura que se utiliza para la topología no es la misma que la utilizada para su análogo geométrico. **La información topológica** está determinada por sus elementos: las láminas o placas (caras facetadas) y nodos (puntos). Éstos a su vez, tienen sus **enlaces** (líneas) que son sus **conectores** (líneas de pliegue o barras). Los **enlaces** son una lista de información sobre qué elementos están unidos entre sí. El **enlace** de un **nodo** es la información relativa a otros nodos con los que está conectado (por barras). En el caso de las **placas**, el enlace es la información relativa a las placas vecinas con las cuales están conectadas (por las líneas de pliegue). La **valencia** de un elemento (placa o nodo) es su número de enlaces (líneas de pliegue o barras).

Pasando a un nivel estructural gráfico, se debe señalar que una estructura de datos (como por ejemplo en un poliedro), usualmente contiene los dos tipos de información en el objeto (geométrica y topológica). Por un lado, la topología entrega la relación de adyacencia o proximidad entre caras poligonales o sectores parametrizados. Por otro lado, la geometría describe las coordenadas precisas de los vértices o puntos de control que definen caras o sectores.

5.3.2. Transformación Topológica.

La topología puede ser apreciada como la fuerza unificadora que mantiene la integridad de una geometría indefinidamente cambiante. En topología el sentido de igualdad es muy amplio. Por ejemplo, si tomamos la topología de un triángulo es la misma que la de una circunferencia, ya que se pueden transformar el uno con el otro de forma continua, sin romper ni pegar. Las transformaciones topológicas, afectan principalmente a la estructura relacional y por lo tanto, a la forma resultante. Por ejemplo, un rectángulo podría transformarse en un triángulo al suprimir uno de sus vértices. El vértice seguiría formando parte de la forma intermedia, pero ya no conformaría una esquina sino que sería parte de un lado del triángulo.

A nivel gráfico, una **transformación topológica** o un **homeomorfismo** de una figura respecto a otra es descrita como una correspondencia continua e inversa (bi-unívoca) entre los puntos de las respectivas figuras. El mapeado uno-a-uno entre los puntos de la superficie de los dos objetos debe mantener la conexión y cercanía entre los puntos de cada una de las figuras. Básicamente, en una transformación entre dos formas (A y B), se dice que tienen la misma topología si existe una proyección (mapeado) biyectiva continua y si también el mapeado inverso es continuo. En esencia, un homeomorfismo deforma el objeto A en el objeto B sin romperlo o rasgarlo. Para esto las operaciones topológicas involucran el plegado, el estiramiento, la compresión, la torsión; pero en ninguno de los casos, el despiece o recorte de las figuras u otro tipo de intervención que pueda

(16) Un poliedro simple puede ser convexo o no convexo.

producir la ruptura del campo de su superficie.

En un entorno gráfico de un morphing, se asume que en una transformación topológica las **formas fuente** son **superficies orientables**. Esto quiere decir que las superficies poseen dos lados (anverso y reverso) y el sentido del vector normal se conserva. Es por esta razón que las caras de los objetos se pueden pintar de diferentes colores, como en el caso de la esfera y el toro que se le puede asignar un color interior diferente del exterior. Por el contrario, un caso distinto de estructuras topológicas son la **cinta de Möbius** y la **botella de Klein**, las cuales son muy atractivas por su ambigüedad en la definición de los límites entre el interior y exterior. Ambas son **superficies no orientables** y la segunda además, es cerrada.

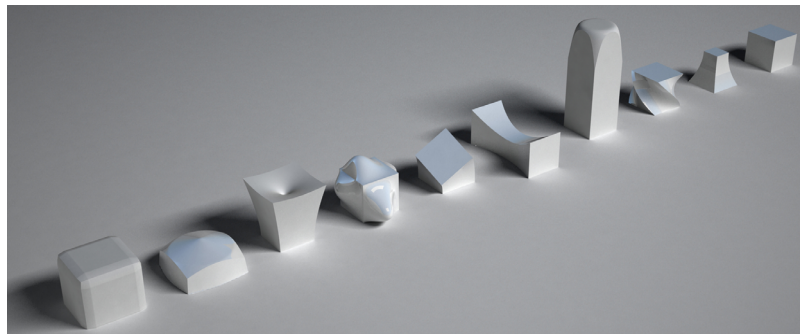


Fig 9. Figuras homeomorfas a un cubo. Cuando se trata de la topología, se deben dejar de lado las propiedades geométricas, pero se debe tener en cuenta la forma en que los objetos están conectados. Si por ejemplo, se tienen distintos modelos de un cubo y se van deformando cada uno, sin crear aberturas ni nuevas conexiones, se podría encontrar la manera de ir mapeando cada una de estas superficies (cerradas) deformadas para que vuelvan a ser un cubo.

Dos superficies se consideran **topológicamente idénticas** o **homeomorfas**, es decir, el equivalente topológico de **isomorfo** (igual forma), si de alguna forma imaginaria una de las superficies puede ser ideada como una membrana flexible, que tenga la capacidad de deformarse y transformarse en la otra superficie, sin realizar algún recorte en su forma. En esta deformación, los puntos que están próximos entre ellos sobre la superficie original, deben seguir estando cercanos a su posición en la superficie deformada. Para que dos elementos sean topológicamente similares deben tener el mismo número de trozos, de huecos, de intersecciones, etc. En los objetos está permitida las operaciones de doblar, estirar, encoger, retorcer, etc; pero siempre que se realicen sin romper ni separar lo que estaba unido, ni pegar lo que estaba separado⁽¹⁷⁾. Desde el punto de vista matemático esta definición es bastante relativa, ya que las superficies no tienen espesor y no pueden ser tratadas como un material elástico. Sin embargo, es una manera fácil de visualizar las diferentes familias de superficies. Por ejemplo, según esta definición, un cubo es homeomorfo a una esfera, así como un toro (una rosquilla) a una taza con asa.

(17) DeCarlo D, Gallier J (1996) Topological evolution of surfaces. Graphics Interface '96, Toronto, Canada, Canadian Human-Computer Communications Society, pp 194±203.

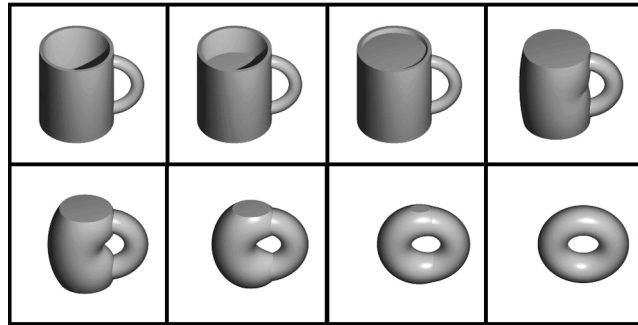


Fig 10. Morphing entre figuras homeomorfas: una taza con asa y un toro (rosquilla).

Como ejemplo, un disco plano, una superficie rectangular delimitada por cuatro segmentos de línea recta y un trozo de superficie esférica limitada por tres arcos circulares, son objetos topológicamente equivalentes. Además, son superficies abiertas porque tienen un límite. Estos tres ejemplos están simplemente conectados, tienen sólo curvas que limitan sus superficies y no poseen agujeros. Esta cualidad de los **homeomorfismos** es particularmente interesante, ya que se centra en la estructura relacional de un objeto y no en su geometría. Así, una misma estructura topológica podría manifestarse en un número infinito de formas geométricas.

Hasta este punto se ha expuesto el concepto de homeomorfismo desde un punto de vista visual. A continuación se desarrollará este concepto desde un punto de vista matemático. Así, una forma más fiable de verificar si dos superficies son homeomorfas, se basa en un descubrimiento realizado por Leonhard Euler. Él observó que al inscribir un poliedro a una **esfera**, se cumple **la fórmula de Euler** para poliedros:

$$V - A + C = 2$$

Siendo **V** el número de vértices del poliedro, **A** el de aristas, **C** el de caras y el número **2** el valor de la **Característica de Euler** para este tipo de superficie. Esta fórmula descubierta por Euler, relaciona el número de vértices, aristas y caras de un **poliedro simple**⁽¹⁸⁾.

Lo importante de esta fórmula es que representa una **invariante topológica**⁽¹⁹⁾. Esto significa que si se deforma(n) la triangulación (o los polígonos) y la esfera continuamente (doblándola o estirándola, pero sin romperla), los valores de V, A y C no varían. Por ejemplo, si se deforma la esfera en un cubo, la fórmula seguirá siendo válida para el cubo ($8 - 12 + 6 = 2$). Asimismo, si se dividen las caras del cubo en dos triángulos dibujando una diagonal por cada cara, se sigue manteniendo el valor ($8 - 18 + 12 = 2$).

Algo semejante ocurre con la **semiesfera**, que es la mitad de una esfera con una abertura circular en su ecuador. Si se inscribe en el interior de esta concavidad un poliedro abierto en su base (sin la cara de la base),

(18) Poliedro simple es aquel que no tiene orificios, podría hincharse o deformarse hasta formar una esfera (homeomorfo a una esfera).

(19) Invariante topológica. Desde un punto de vista matemático, invariante es algo que no cambia al aplicarle un conjunto de transformaciones. Desde un punto de vista formal, una entidad se considera invariante bajo un conjunto de transformaciones, si la imagen transformada de la entidad es indistinguible de la entidad original. Alude a aquellas propiedades de un objeto que no experimentan cambios al deformarse, siempre y cuando dicha deformación no contemple el añadir o sustraer partes por medio de cortes o aberturas. También tiene relación con cada una de las distintas propiedades primitivas que deben permanecer inalteradas en un objeto, con el fin de que retenga su integridad desde un punto de vista topológico.

se cumple **la formula de Euler** siguiente:

$$V - A + C = 1$$

La formula de Euler para la semiesfera se puede aplicar en diferentes volúmenes, como por ejemplo, en una pirámide desprovista de su base y alineada con el plano que forma la abertura en el ecuador de la esfera e inscrita a esta semiesfera. En dicho caso también se obtiene ($4 - 6 + 3 = 1$).

Adicionalmente, esta fórmula se cumple también para todo **polígono cerrado simple**⁽²⁰⁾ que cumpla ciertas condiciones. Estas condiciones son: que el polígono no se corte a sí mismo, que su interior pueda ser triangulado de forma que no coincidan los triángulos unos con otros y que en la triangulación cuando se encuentren dos triángulos lo hagan a lo largo de un borde o un vértice común. En general, esta fórmula funciona para toda superficie con un borde que la limite y sea orientable.

Existen otro tipo de superficies cerradas orientables pero que tienen aberturas, como es el caso de un toro, el cual es un equivalente topológico a una esfera con una abertura a través de su interior (como si fuera un conducto). De esta forma, es posible demostrar que cualquiera de estas superficies cerradas orientables son equivalentes a una esfera con un cierto número **g** de **asas o aberturas**. Este número **g** se llama el **género topológico** de la superficie, donde una esfera tiene género igual a cero y un toro tiene género igual a uno. A modo general, la característica de Euler para una superficie cerrada orientable con **género g** es igual a:

$$V - A + C = 2 - 2g$$

Para finalizar, la aportación de esta fórmula es que las superficies que comparten el mismo valor de la característica de Euler son homeomorfas y por lo tanto, pueden ser transformadas (mapeando puntos) entre ellas sin realizar un cambio topológico. En este sentido, un toro no puede ser transformado en una esfera (no son homeomorfos), pero es evidente que el toro puede ser transformado en una esfera con una asa o en un paralelepípedo con un agujero.

5.3.3. Evolución topológica: transformaciones con cirugía topológica.

La tarea de transformar una esfera en un toro, ejemplifica un problema general de la metamorfosis entre dos objetos con distintas superficies topológicas. A diferencia de la geometría de una forma, que es una especificación de las localizaciones de los puntos en el espacio, la topología de la superficie de una forma está especificada por la conectividad de dicha superficie.

Si se realiza una deformación simple a una forma (un cambio geométrico), la superficie topológica del objeto transformado no cambia. Sin embargo, para realizar la transformación entre dos formas que tienen distintas superficies topológicas no basta con una simple deformación, ya que se debe realizar una operación apropiada

(20) Un polígono simple es un polígono cuyos lados no adyacentes no se intersecan. Esta figura divide al plano geométrico que lo contiene en dos regiones: la región interior al polígono y la región exterior a él.

para una transformación particular.

En el caso de una transformación con cambio topológico, la correspondencia entre los dos objetos que especifica dónde terminan las características de un objeto en el otro objeto, debe también indicar cómo ocurre el cambio. Así, para realizar una **transformación paulatina** entre dos formas con **topologías diferentes** se debe realizar una **interpolación geométrica** sumado a una **evolución de la topología**. Estos dos procesos están estrechamente ligados y solamente una combinación apropiada de ellos producirá en forma paulatina una transformación correcta. Según **De Carlo y Gallier** una transformación paulatina se define a partir de las siguientes características:

- A lo largo de la transformación, no se presentan saltos discontinuos en la forma. Esto quiere decir que durante el proceso no se producen prominencias, ni hundimientos repentinos en la forma.
- No ocurren cambios topológicos no deseados, como una abertura o rajadura (*splitting open*) de una superficie.
- Las formas transitorias del proceso de transformación deben mantener una relación uniforme. De esta forma, las etapas intermedias no presentan distorsiones excesivas.

En la técnica del morphing, la interpolación geométrica está incluida dentro del proceso y en algunos casos puede estar relacionada con una deformación del objeto, con el fin de mantener una geometría razonable. Sin embargo, la **evolución topológica** es un procedimiento que se añade al proceso y que puede incluir **las operaciones de cirugía topológica**.

Una **cirugía topológica** consiste en alterar la topología de una forma. Esto implica realizar una operación de corte y pegado de una superficie, pero también puede incluir agregar o quitar un agujero, como también pinchar y abrir una superficie cerrada con la finalidad de desarrollar un límite o borde. Es crucial para obtener una transformación fluida, que **las formas intermedias** que se crean con las operaciones de cirugía topológica ocurran en un solo momento en el transcurso del desarrollo de la transformación. De esta forma, en el momento de la operación con cirugía (cuando se altera la topología), sigue habiendo el mismo aspecto de la forma sin cambiar, aunque el cambio topológico haya sido realizado.

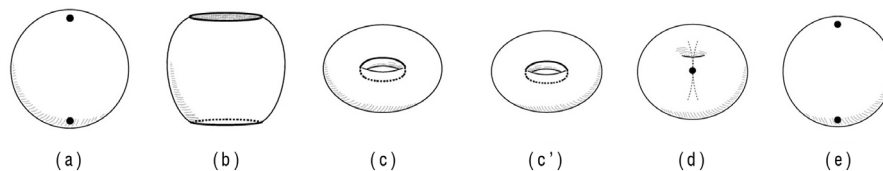


Fig 11. DeCarlo y Gallier (1996). Dos opciones para la transformación entre una esfera y un toro con una operación de evolución topológica. En la opción 1 (a-b-c) se pincha la esfera en los dos polos, cortando y estirando para transformar los puntos en círculos. Luego se genera una forma tubular donde las anillas (círculos) se juntan y pegan para formar la abertura del toro. La opción 2 (e-d-c') se comienza igual que el caso anterior (puntos en los polos). Estos puntos estiran la forma hacia el centro de la esfera hasta que se juntan y pegan. Luego se genera la abertura de la esfera a partir de las dos hendiduras generadas que transforman el punto común en un círculo, que posteriormente se convierte en la abertura interna del toro.

En la realización de un morphing desde un punto de vista topológico, si dos superficies difieren entre sí (no son homeomorfas) no existe un mapeado inverso⁽²¹⁾ entre ellas. Sin embargo, en estos casos de evolución topológica se establece una cierta clase de correspondencia. Esta correspondencia está determinada localmente por los mapeados inversos en cualquier lugar de las superficies, excepto donde los cambios de topología ocurren.

Cuando ocurre un cambio topológico notorio entre formas, una de las posibles formas de transición puede ser una topología con una forma tubular. Este caso se da en el ejemplo de la figura donde se produce la transformación de una esfera y un toro. De esta forma, el mapeado inverso se localizaría por toda la superficie con excepción del límite o frontera de las anillas del tubo donde los cambios de topología ocurren. Cada uno de los extremos de la forma tubular abierta son mapeados desde los polos respectivos de la esfera. Básicamente, cada círculo (anillas) de los límites en los extremos de la forma tubular se despliegan desde un punto. Este despliegue viene dado desde los polos de la esfera, los cuales son pinchados durante la transformación para después mapear los extremos de la forma tubular hacia las anillas centrales del toro y luego, ser pegados en forma coincidente.

De Carlo y Gallier⁽²²⁾ implementaron un procedimiento para especificar la correspondencia por parte del usuario, utilizando una **mallá de control independiente** a la forma que definía la geometría y topología de la superficie. El usuario situaba puntos o nodos de la mallá de control sobre la superficie de la forma, conformando aristas que seguían la superficie de ésta. La especificación de la mallá de control daba al usuario un dominio total sobre aquella parte de la superficie que deseaba mapear sobre la otra superficie. Además, permitía que el usuario decidiera cómo y dónde ocurrirían los cambios de topología. De esta forma, el usuario realizaba acciones como pegar y cortar la superficie. Por una parte, el pegado se lograba teniendo la correspondencia de dos caras que no eran adyacentes (no compartían ninguna arista), pero que en la forma destino compartían una arista común. Por otra parte, el corte de una superficie que por ejemplo, implicaba abrir y estirar un único punto de la superficie de la forma para transformarlo en una curva de borde, era pegada y alineada con otra curva de borde, para cerrar nuevamente la superficie. Generalmente, se agregaban los bordes mediante la asignación de nodos a lo largo de las aristas de control para especificar dónde era cortada la forma de transición. Estas dos particiones de superficie (cortadas) realmente se separaban topológicamente, desarrollando dos bordes que podían interactuar en forma independiente o conjunta, dependiendo de la acción a desarrollar. En las particiones de la forma donde no ocurría ningún cambio topológico, el usuario delimitaba y construía un isomorfismo gráfico local entre partes correspondientes de la mallá de control.

(21) Mapeado inverso: para cada punto con coordenadas en el dominio de la forma final, se buscan los puntos del dominio de la forma inicial.

(22) DeCarlo, Douglas, and Jean Gallier. 1996. Topological evolution of surfaces. Paper presented at Proceedings of GI'96, .

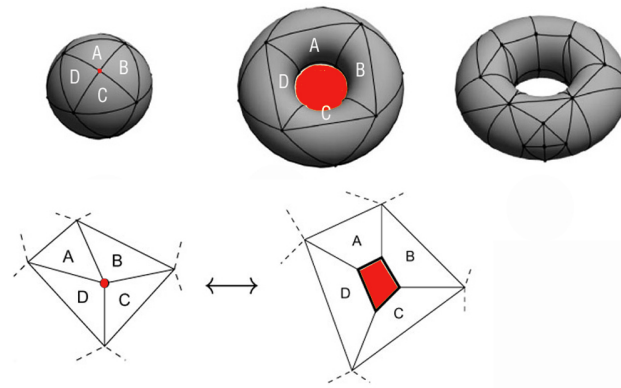


Fig 12. DeCarlo y Gallier (1996). Malla de control sobre una esfera que se transforma en un toro en una operación de evolución topológica.

Las formas intermedias que definen la transición poseen restricciones adicionales con el fin de garantizar una transformación paulatina y evitar cambios repentinos en la forma o aberturas de superficies. Estas formas dirigen las deformaciones en las regiones que han sido separadas durante la evolución topológica. Las regiones de la forma donde ocurren estas deformaciones van secuenciando los bordes o aristas de la malla de control, dirigiendo las particiones que deben estar conectadas en las localizaciones donde se produce la cirugía u operación topológica.

5.3.4. Topología aparente del modelo gráfico.

Entender las formas a partir de su transformación continua, hace que la geometría pase a un segundo plano y que la topología pase a formar parte del estudio comparativo de las formas que cambian. La topología permite una clasificación diferente de las formas. De esta manera, dos formas son homeomorfas si se pueden igualar entre sí por medio de transformaciones, sin realizar aberturas sobre la forma ni uniones de pegado.

A nivel gráfico, la definición de las características topológicas de los objetos a transformar está determinada por el programa (software) utilizado y la especificación en el control de las formas de transición en el morphing. Sin embargo, realizar una operación con evolución topológica incluyendo una cirugía, aún no está del todo implementada en el común de los programas de animación que utilizan la técnica del morphing. Es por esta razón, que existen otros mecanismos gráficos para lograr, por lo menos en apariencia, procesos más complejos de transformación que resultan ser mucho más simples.

Una primera aclaración respecto a un ambiente gráfico para un programa de morphing es **lo que se ve representado no siempre es lo mismo de lo que se edita**. Esto quiere decir que en una interface gráfica la forma que se ve como resultado, tanto en imágenes, secuencias de videos o formas intermedias, etc; no tiene necesariamente una concordancia, similitud o equivalencia directa con la forma que se edita. A nivel gráfico, se pueden realizar una serie de “artificios” en la representación del objeto transitorio (forma intermedia), con el fin de hacer creíble el proceso de transformación.

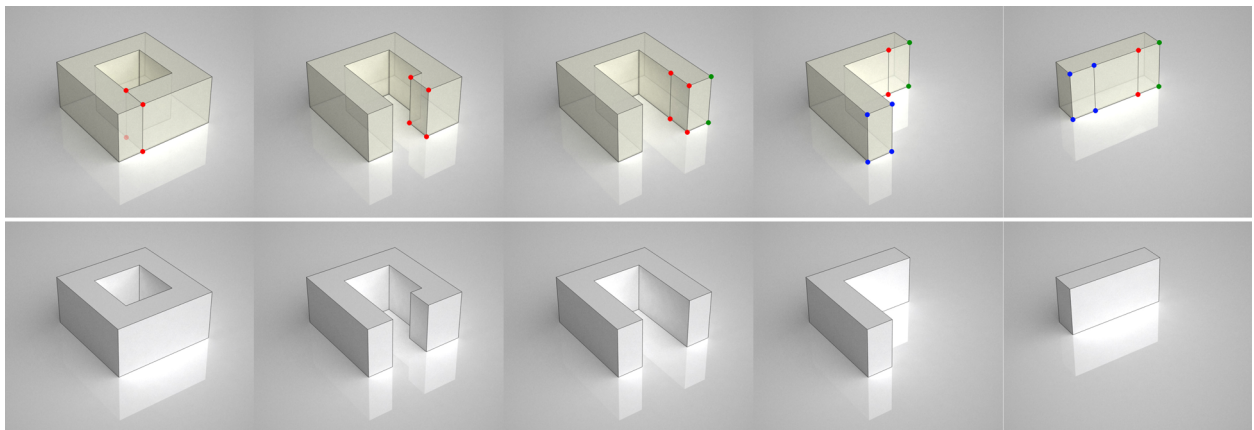


Fig 13. Secuencia de transformación entre un paralelepípedo con una abertura y un paralelepípedo cerrado. En la parte superior se aprecia el mapeado de puntos desde un punto de vista gráfico. En la parte inferior se encuentra el resultado de la secuencia representada.

En el común de los casos se utilizan **superficies o mallas poligonales cerradas**, siendo todas las formas transformadas superficies cerradas orientables. En el caso de trabajar con formas que presentan aberturas (tienen otro género topológico) no se modelan como tal, sino que en realidad son modeladas con formas gráficas o superficies totalmente cerradas con un mapeado específico de puntos. Así, mediante un correcto mapeado y una superposición de caras y puntos se logra una apariencia distinta. En este sentido, el mapeado de puntos cumple un rol específico en la configuración de aberturas en la forma. A partir de un mapeado correcto de los puntos, la forma es estirada y deformada, dando la impresión de tener aberturas y siendo realmente prolongaciones de caras que se solapan entre ellas para dar la impresión de estar conectadas y cerradas.

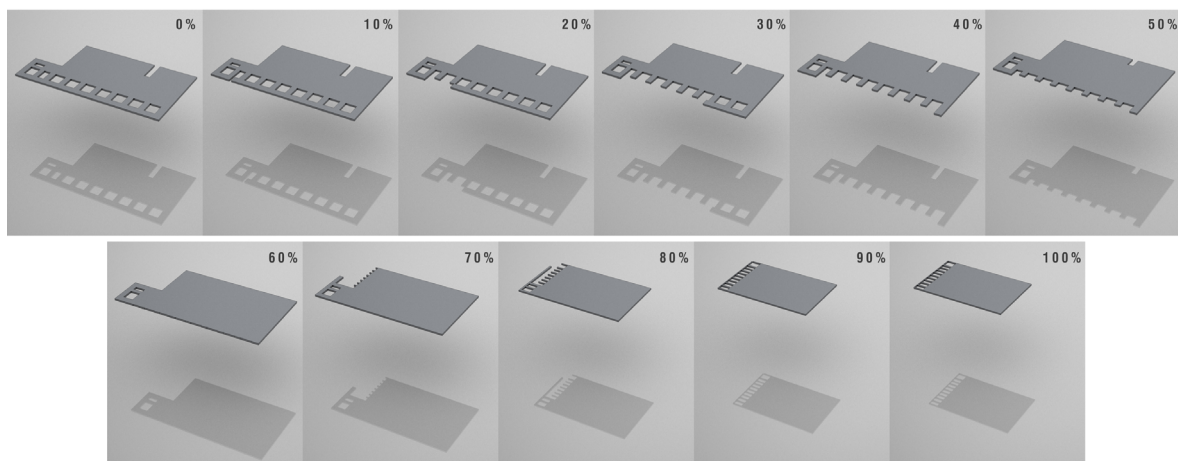


Fig 14. Secuencia de transformación donde la forma de la cubierta simula una evolución topológica, pasando de una forma con diez aberturas (0%) a otra forma con sólo dos aberturas (60%), para terminar nuevamente con una forma con diez aberturas (100%) en otro costado. Gráficamente la forma es una malla poligonal cerrada con dos aberturas. Mediante un correcto mapeado junto con una superposición de caras y puntos, se logra una apariencia topológica distinta.

En las formas originarias (origen y destino) del morphing, el número mayor de vértices no sólo designa cuál será el **objeto híbrido preponderante**, sino también valida la geometría del objeto (origen o destino). Esta

geometría será adaptada (por medio del mapeado) a la geometría del otro objeto, reposicionando los puntos del objeto final. De la misma forma, presenta una topología del objeto que mantiene sus características (forma cerrada sin aberturas), pero también está determinada por el número mayor de vértices, con el fin de lograr adaptar y posicionar el total de vértices para lograr en apariencia la forma destino (asimilando otra topología con posibles aberturas en su forma). De esta manera, el objeto con mayor número de vértices (origen o destino) es el que se ajusta a la geometría con igual o menor número de vértices del otro objeto, asimilando en apariencia la topología del otro objeto pero manteniendo sus propiedades topológicas originarias.

5.4. Control de transición (formas claves) y mapeado de puntos geométricos.

En un programa de morphing asociado a un paquete de animación, se suele proporcionar un conjunto de rutinas para la gestión de la base de datos de objetos. Esta base de datos permite almacenar y actualizar las formas de los objetos y sus parámetros asociados. Además de las funciones para manipular los objetos, se incluyen también las rutinas necesarias para generar movimientos, deformaciones y transformaciones. Dentro de estas últimas, se encuentran de forma específica los sistemas para determinar las **formas claves** en las secuencias intermedias. Estas **formas claves** definen los puntos de paso entre el inicio y final de cualquier transición fluida entre formas. Algunos ejemplos de su utilización para animación pueden ser la modificación de un personaje en otro, principalmente cuando se realizan ciertos retoques a la forma para añadir interés a la animación. Otro uso muy popular es la animación de expresiones faciales y labiales en personajes animados. Adicionalmente, estas formas claves permiten almacenar configuraciones de la forma, ya que proveen una manera muy conveniente de guardar los cambios formales para ser utilizados en distintas ocasiones.

A nivel técnico, existen implementaciones que permiten realizar la transformación combinatoria de las formas elegidas de forma automática. En estos procedimientos el usuario designa las dos formas originarias y el programa realiza la interpolación automática entre las dos formas. Esto lleva a encontrar en muchos de los casos algunas sorpresas “inesperadas” en la transición automatizada por el programa. En este sentido, es muy importante el **control por parte del usuario** para poder manipular la descomposición transitoria de la forma, de modo que pueda lograr un **control de transición** que mantenga las características de los modelos clave. Este control del usuario se logra básicamente mediante la selección de dos objetos base (origen y destino) y la asignación de un número intermedio de pasos de transición (formas claves) a lo largo del tiempo. Lo esencial de esta transformación no reside en la forma de destino, sino en las **fases intermedias**, a través de las cuales las interpolaciones logran crear las transformaciones que llevan a la forma final. Ésta es una transición continua de una forma evolutiva guiada, que avanza a través de una serie de etapas previstas.

Una tarea importante dentro de la especificación del morphing animado es la **descripción de la escena**. En ella se incluyen el posicionamiento de los objetos, la definición de parámetros fotométricos (intensidades de fuentes luminosas y propiedades de iluminación de superficies), parámetros de cámara y otras funciones standard como la especificación de acciones. Dentro de estas últimas, se encuentran las transformaciones geométricas para generar movimientos de los objetos, en función de las aceleraciones o cambios de formas determinados por las formas claves que van guiando las transiciones. El morphing es un derivado de la técnica de animación 3D. Esta técnica hace posible tener un objeto gráfico en un espacio virtual y cambiar su forma conforme pasa el tiempo. Estos cambios (deformaciones o transformaciones) se guardan a lo largo del tiempo en puntos de transición llamados **claves** (keys), los cuales al ser representados en la línea de tiempo para la producción de un video pasan a llamarse **fotogramas claves** (keyframes). Los fotogramas claves pueden almacenar cualquier tipo de información referida a la localización de una cámara o un objeto, su textura, color o cualquier propiedad del material que posea. En este sentido, la información relativa a la forma y su transformación gradual a través del tiempo, en conjunto con un número intermedio de pasos de transición, se almacenan a través de claves en la línea de tiempo, las cuales se denominan **formas claves** (keyshapes).

Originalmente, los **sistemas de fotogramas clave** fueron diseñados como un conjunto de rutinas de animación independientes con el fin de generar **fotogramas intermedios** a partir de los fotogramas claves especificados por el usuario. La animación 3D conserva muchos términos y técnicas de los métodos tradicionales de animación. En la animación tradicional, el director de animación trazaba la **postura clave o fotograma clave** para mostrar el punto de mayor interés de la acción. Los animadores ayudantes dibujaban los fotogramas intermedios o de relleno con el fin de que la acción fluyera con suavidad. En la animación 3D, se crean **fotogramas claves** cambiando los parámetros o transformando los objetos en el tiempo. Los controladores de animación almacenan esos valores en **claves de animación** e interpolan instantáneamente los valores de los fotogramas de relleno utilizando funciones matemáticas. Cuando se especifican las características de movimiento y transformación de los objetos como parte de la definición de esos mismos objetos, se hace uso de los sistemas parametrizados. Estos sistemas permiten que los parámetros sean ajustados con el fin de controlar las características de los objetos, como por ejemplo los grados de libertad, limitaciones de movimiento y los cambios permitidos en la forma.

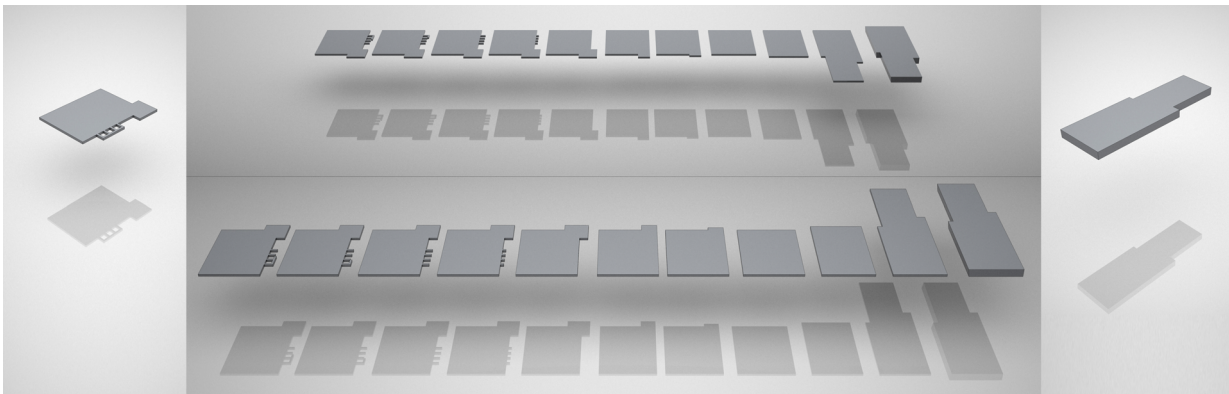


Fig 15. Formas claves utilizadas para definir las transiciones entre los dos objetos originarios (inicio y termino)

Las formas claves funcionan como un mecanismo de control que permite almacenar las características de distintas formas, de tal manera que pueden superponerse y actuar varias de ellas a la vez en la forma de transición. El ejemplo característico es el caso de la animación facial, donde se van guardando los distintos gestos de la cara, con el fin de superponerlos cuando se requiere algunos gestos de expresión más definidos. En el caso del morphing arquitectónico este mecanismo es útil para condicionar ciertas tensiones formales, o para lograr ciertas mezclas exploratorias con el fin de obtener una variabilidad de resultados. Si se seleccionan uno o más destinos, los **pasos claves** pueden ser establecidos para que la forma pase a través de esas transiciones. Estos modelos de **formas claves** son fundamentales para el morphing y se obtienen creando copias de la forma inicial, que son modificadas anticipadamente a través de deformadores paramétricos o manipulando directamente la superficie. Existen casos en que las operaciones de morphing requieren que las formas gráficas de origen y destino tengan la misma cantidad de vértices, ya que no se pueden crear nuevos puntos al realizar una transformación. Este es el motivo por el cual en una transformación entre modelos con un número dispar de vértices, sea el de mayor número el que determine el número de puntos utilizados en la transformación. Así, será la forma gráfica con mayor número de puntos, la que iguale la forma geométrica del modelo que tenga un menor número de puntos.

Se debe tener en cuenta que, en una transformación cuando a la forma inicial se le asigna la forma de destino, se crea automáticamente un parámetro denominado **grado de transición** que va de 0 a 100: siendo 0 una transición que iguala a la forma origen y 100 una transición que iguala a la forma de destino. De esta forma, este parámetro muestra el porcentaje de avance de la transición entre las formas originarias (origen y destino).

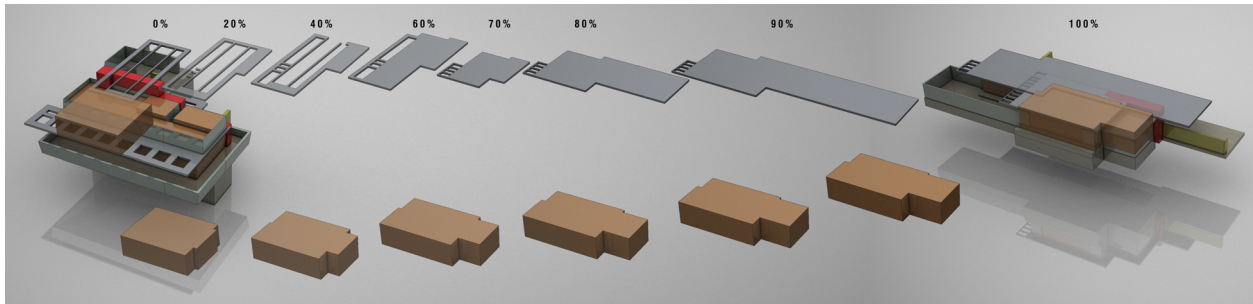


Fig 16. Secuencia de transformación de la casa Sturges y Goestch Winckler en los elementos de cubierta y de la volumetría espacial. La sucesión de elementos muestra el porcentaje de avance de la transición entre los modelos de origen y destino.

Es importante hacer notar que a nivel gráfico en un morphing donde se utiliza el mapeado de puntos, el elemento que gobierna el proceso de transformación puede ser tanto la forma de origen como la de destino. Todo depende de aquella forma que tenga un **mayor número de puntos para mapear**. Esta forma gobierna sobre la otra, debiendo conservar su topología y sus propiedades gráficas determinadas por el número de puntos que conforman su apariencia geométrica.

En este contexto, el **morphing arquitectónico** mantiene la integridad morfológica de los objetos involucrados, ya que un objeto se convierte en otro objeto como una sola entidad. Un cubo (hexaedro regular), por ejemplo, puede ser transformado gradualmente en una pirámide. Desde el punto de vista del espectador, siempre hay dos objetos: el original (fuente), al que se le aplica la transformación, y el objeto de destino (meta), que es aquel objeto donde podrá llegar el paso final de la transformación. Sin embargo, en la práctica hay solamente un objeto, que es transformado de un estado (original) en otro (destino). Este objeto combina las características de los dos objetos involucrados en la transformación y por lo tanto, es llamado un **objeto híbrido**. Este objeto en realidad, está compuesto por la topología de uno de ellos y la geometría del otro. Es un objeto disfrazado y aunque su topología es idéntica a uno de ellos, posee una similitud geométrica con el otro. En este sentido, existe una discordancia entre la forma representada y la forma que se edita a nivel gráfico. Existen algunos casos de transformación en los cuales para representar una forma geométrica compuesta por un cierto número de vértices, se utiliza un mayor número de puntos editables a nivel gráfico. Todo esto se debe a que el objeto híbrido (que representa las dos formas) ha sido obtenido de forma que posea el mayor número de vértices en su representación. Por ende, gráficamente presenta un mayor número de puntos.

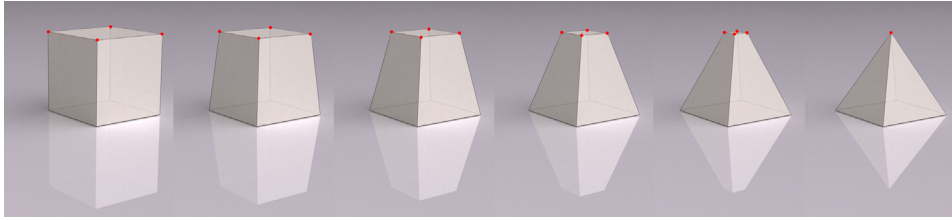


Fig 17. Transformación de un cubo (hexaedro regular) en una pirámide. Los ocho vértices del cubo son transformados en sólo cinco vértices visibles de la pirámide. Los cuatro vértices superiores del cubo son mapeados a una misma posición conformando un solo vértice en la cúspide de la pirámide.

5.5. Estrategia de transformación.

El mundo de las formas naturales está en constante cambio. Este cambio se manifiesta a través del crecimiento, el desarrollo, la decadencia física, la evolución, etc. El desarrollo de una forma natural óptima estaría gobernada por las leyes de la física y el principio de la economía de medios. Así, la naturaleza procede de la manera más simple y eficiente⁽²³⁾. Ésta sería su estrategia de transformación.

Fundamentalmente el morphing está basado en la idea de un objetivo. Esta idea conceptual que permite intuir el funcionamiento del morphing tiene un doble sentido. Por una parte, describe los términos formales en que se enmarca la operatoria de transformación, es decir, demarca los límites extremos (forma inicial y final). Pero también tiene un sentido variable, ya que establece los estados de transición que deberá cumplir la forma para llegar a la forma final. Así, el objetivo está asociado con un canal que registra e impone ese estado transitorio sobre la propia forma. Esta variabilidad que presenta la forma es particularmente importante debido a que está determinada por la interacción del usuario en el control de las formas de transición. Esta transición puede ser ideada a nivel global mediante una **estrategia de transformación**, la cual sirve como pauta para direccionar las intenciones dispuestas por el usuario al precisar el morphing.

En la estrategia de transformación están relacionados dos conceptos: la **temporalidad del proceso** y los **cambios significativos**.

Si todo cambia al mismo ritmo, la distancia diferencial es constante, lo cual impide que el cambio pueda ser percibido. En contraste, lo repentino, lo abrupto y lo inesperado son características de cambio; mientras que lo constante, lo suave y lo predecible no lo son. Sin embargo, en el caso del morphing para arquitectura y sobre todo para la animación, es importante que el ritmo de cambio sea paulatino para lograr una temporalidad equilibrada del proceso.

En el morphing la temporalidad del proceso está demarcada por los dos extremos (origen y destino). A lo largo de este proceso la forma puede manifestar el cambio a través de su propio ritmo de deformación. Si el tiempo consta de una sucesión de instantes discontinuos, entonces el cambio puede ser concebido como la superposición de deformaciones concatenadas en un espacio de tiempo. Más allá de ello, en el morphing arquitectónico lo que interesa de la temporalidad del proceso es que sin importar el momento en que se extraiga el modelo transitorio, éste pueda ser válido y viable desde un punto de vista arquitectónico.

La temporalidad del proceso se puede contraer o expandir provocando que la secuencia vaya más rápida o lenta. La carga de eventos de cambios determinará la duración total de la transformación, garantizando que la temporalidad sea equilibrada. Como el morphing arquitectónico funciona en base a la unión de diferentes parejas de volúmenes (volumetría de inicio y de destino), cada transformación es independiente según cada pareja. Es así como la totalidad del modelo se define al transformar a la vez todos los volúmenes. De esta forma, se logra accionar en conjunto el modelo de transformación. Esto lleva a realizar ciertos ajustes en los momentos donde ocurren las acciones que modifican los volúmenes, sincronizando algunas transformaciones

(23) Ver libro Tromba, A., & Hildebrandt, S. (1985). Mathematics and optimal form. New York: Scientific American Library.

y retardando otras.

La **estrategia de transformación** consiste en idear a grandes rasgos el total de la transición, precisando las instancias problemáticas donde se realizará alguna transformación o evolución topológica, desplazamientos o deformaciones de volúmenes, alteración de una forma o cualquier otro tipo de modificación **significativa** en el proceso. Sin embargo, pueden existir otro tipo de cambios de menor jerarquía a lo largo de toda la transformación, los cuales están condicionados por los **cambios significativos**.

Un modo de simular una estrategia de transformación es mediante un **guión gráfico o storyboard**, que consiste en una serie de representaciones o dibujos que darán las pautas de las transiciones que se realizarán en la secuencia de transformación. Este guión puede estar precisado en forma escrita, gráfica o también puede estar esquematizado mentalmente por el usuario.

Una vez realizada una primera aproximación del guión de transformación y su correspondiente morphing, se debería realizar un ajuste en la estrategia de transformación a través de la sincronización de los cambios significativos en los elementos del modelo a transformar. Se trataría de readecuar el momento en que comienzan los cambios significativos, de forma que coincidan en el mismo instante de la transformación. Los cambios de menor jerarquía serán readecuados en consecuencia, pudiendo comenzar con anterioridad o posterioridad. Si a todo esto, se le suma el hecho de que en las casas Usonianas los volúmenes transformados representan elementos formales arquitectónicos y tienen asociada una funcionalidad espacial, en todo momento de la secuencia la forma transitoria seguirá teniendo validez desde un punto de vista arquitectónico

Una forma más flexible de simular la estrategia general de transformación es ir modificando los volúmenes a **medida que se desarrolla el proceso**, partiendo de ideas orientativas sobre las acciones formales. En algunos programas para morphing, son los mismos objetos a transformar (formas claves) los que se van replicando y deformando de una forma mucho más libre y espontánea, sirviendo de modelos para ir dando los avances en las transiciones concadenadas.

Como ya se ha comentado anteriormente, la estrategia de transformación pretende identificar cuál será la problemática en la transformación y la actuación sobre los cambios significativos. Para ello, el autor se ha basado en Tom Bringham⁽²⁴⁾ (el inventor de la técnica del morphing) cuando explica el concepto de morphing evolutivo e introduce el concepto de **estrategia narrativa**, como forma de resolución a la problemática de transformar un elemento adicional en un morphing. Bringham utiliza un tenedor, aludiendo a Louis Kahn⁽²⁵⁾ y su cuchara⁽²⁶⁾ en la ya clásica explicación sobre forma y diseño:

“...El tamaño no importa, sino el número de elementos y las relaciones preexistentes de los elementos que son realizadas para una correspondencia uno-a-uno. En un conjunto de tenedores, cada uno con cuatro

(24) Gans, Deborah, and Zehra Kuz. 2003. The organic approach to architecture. Chichester (England); Hoboken, NJ: Wiley-Academy; John Wiley and Sons. pp. 105-114.

(25) Kahn, Louis I. 1984. Forma y diseño. Buenos Aires: Nueva Visión. p. 8.

(26) “...La forma no tiene figura ni dimensión. Por ejemplo, “cuchara” (el concepto de cuchara) caracteriza dos partes inseparables, -el mango y el receptáculo cóncavo- en tanto que una cuchara implica un diseño específico hecho en plata o madera, grande o pequeña, profunda o no. La forma es el “qué”. El diseño es el “como”. La forma es impersonal, el diseño pertenece al diseñador...”

puntas, un morphing entre ellos es sencillo debido a la correspondencia uno-a-uno.

*¿Pero qué pasa con una serie de tenedores con un número variable de puntas, donde dos dientes pueden ser tres y de tres pasar a ser cuatro? Entonces usted necesita crear un **escenario**, al igual que los dientes extras apareciendo desde un lado o desde abajo. Usted necesita empezar a pensar **estrategias de narrativa**...*

...Podemos estar a medio camino entre el tenedor y la cuchara. Una pieza de plata a favor del padre, una a favor de la madre. Podemos estar a medio camino entre una cuchara y un cuchillo. El que está en el medio, no es necesariamente hermano, es primo o algo así. En su conjunto, estos cubiertos transformados se convierten por analogía en una especie de tribu de individuos en un colectivo, con parentescos y relaciones...”

5.6. Animación y generación de modelos híbridos.

Tradicionalmente, la arquitectura se ha caracterizado por ser percibida como perdurable, ya que se ha buscado continuamente realizar estructuras permanentes que no puedan cambiar físicamente su aspecto estacionario. Gracias entre otros a la evolución de la informática, la idea de una arquitectura estática ha dado paso a una arquitectura transformable, modificable y trasladable.

La representación de las formas arquitectónicas en el proceso de diseño ha evolucionado también. En un principio, a finales de los ochenta comienzo de los noventa, el modo de representar los cambios de formas era mediante el traslape o despliegue de deformaciones, utilizando capas transparentes o secuencias de secciones. Se trataba de un medio de representación donde el producto final no siempre incluía el desarrollo formal que había detrás de su elaboración. Además, se utilizaba el valor de la insinuación visual, donde el cambio de forma no se expresaba sino que estaba implícito.

En los noventa, la utilización del morphing en la arquitectura y el uso de técnicas de animación, posibilitaron un modo para representar los cambios de forma a través de secuencias de imágenes concadenadas. Estas secuencias dieron como resultado una animación en un determinado transcurso de tiempo. Esta animación resultante muestra cómo de forma sincronizada se van sucediendo diferentes configuraciones morfológicas de un modelo (compuesto de distintos elementos), a partir de los parámetros que describen su posición, dimensiones o características físicas en un cierto tiempo.

En un morphing, el modelo que va evolucionando durante la secuencia de transformación, adopta una serie de **formas intermedias** o de transición denominadas **formas híbridas**. Asimismo, la forma híbrida es una forma implícita que indica una mezcla dinámica de fuerzas o rasgos, heredados de sus antecesores o que va siendo moldeada por la actuación de sus operadores. En el caso de las casas Usonianas, la transformación entre un repertorio seleccionado de modelos de casas (modelos originarios) y su combinatoria genera la existencia de híbridos. La aparición de nuevos modelos formales mediante la hibridación es la prueba de que un modelo se está diversificando en múltiples opciones y que dicho proceso puede seguir evolucionando en un proceso de descendencias.

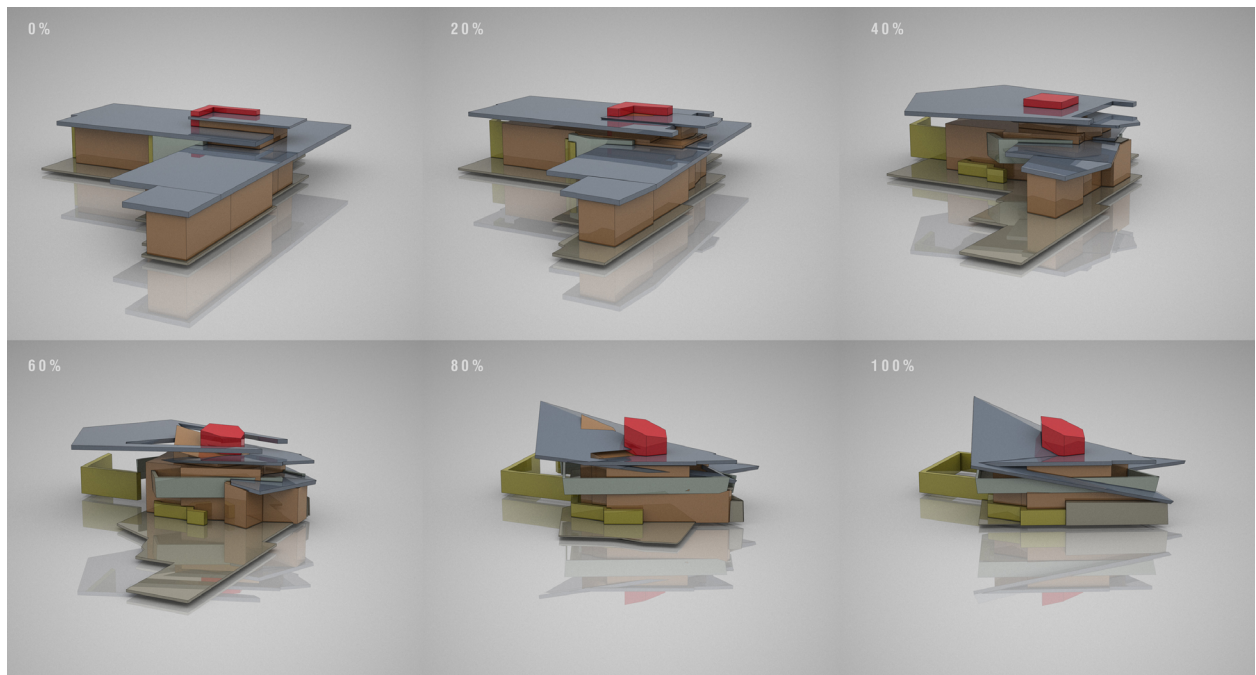


Fig 18. Secuencia de transformación de un morphing entre las casas Jacobs I y Boomer.

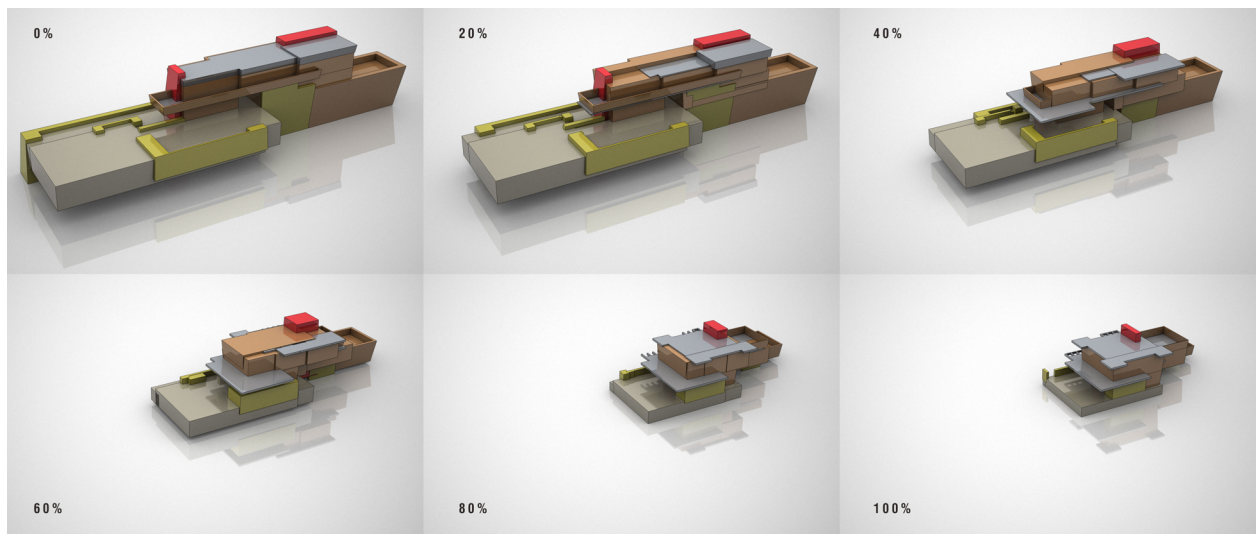


Fig 19. Secuencia de transformación de un morphing entre las casas Pauson y Pew.

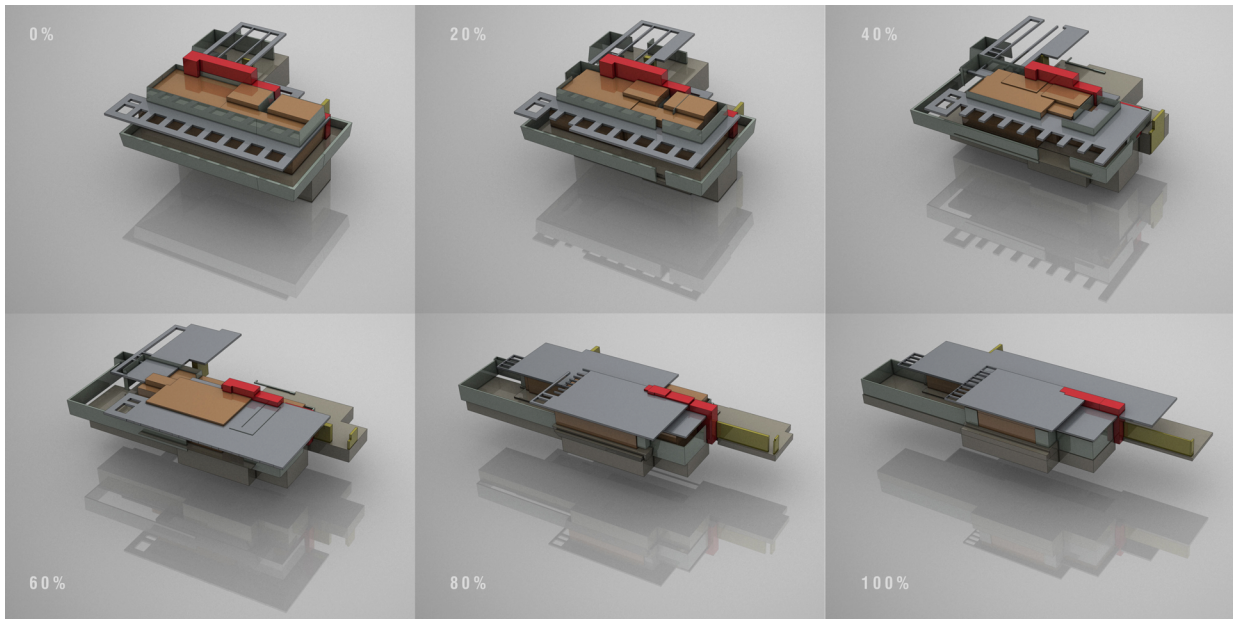


Fig 20. Secuencia de transformación de un morphing entre las casas Sturges y Goestch Winckler.

En una animación la forma híbrida está condicionada por una secuencia de transformación lineal, donde el desarrollo del proceso de transformación está programado linealmente, a partir de las formas originarias (inicio y destino) y las formas claves. La variación que presentan los objetos durante la secuencia de transformación varía en función del **porcentaje de mezcla** o **grado de transición** entre el objeto original y el objeto destino. Básicamente, el porcentaje de rasgos característicos de cada objeto va unido al mapeado correcto de puntos, debido a que se controla el desarrollo gradual de la interpolación de puntos que componen la forma. Según lo señalado anteriormente, este grado de transición está condicionado por la **transformación lineal programada**, pero también, puede funcionar de forma independiente. Para este segundo caso, existe la posibilidad de crear uno o varios modelos híbridos (distintos a los que aparecen en la secuencia programada), especificando en forma independiente el porcentaje de mezcla de los distintos elementos que conforman el modelo. Es decir, se pueden obtener modelos híbridos donde el grado de transición de los elementos que componen el modelo no siguen la linealidad comentada, sino que adoptan los valores de forma autónoma según los especifica el usuario.

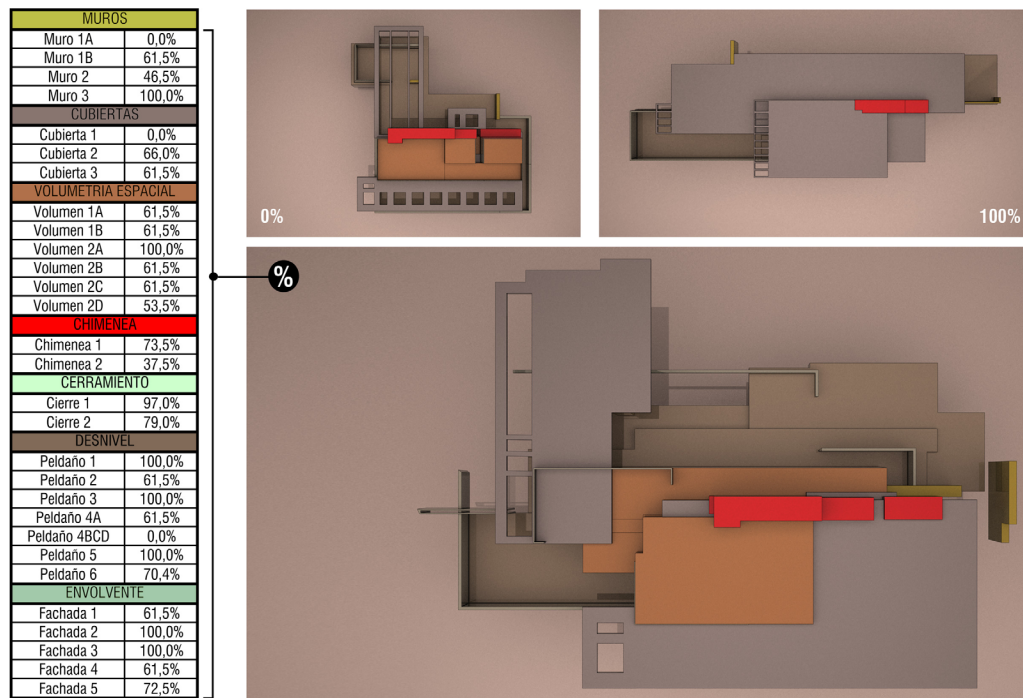


Fig 21. Vista superior del modelo híbrido entre las casas Sturges y Goestch Winckler. Cada elemento del modelo ha sido manipulado con diferentes porcentajes de progresión, según lo especifica la tabla para cada elemento. El modelo no se obtiene en un instante del proceso lineal de transformación, ya que cada elemento es manipulado porcentualmente en su transformación de forma independiente.

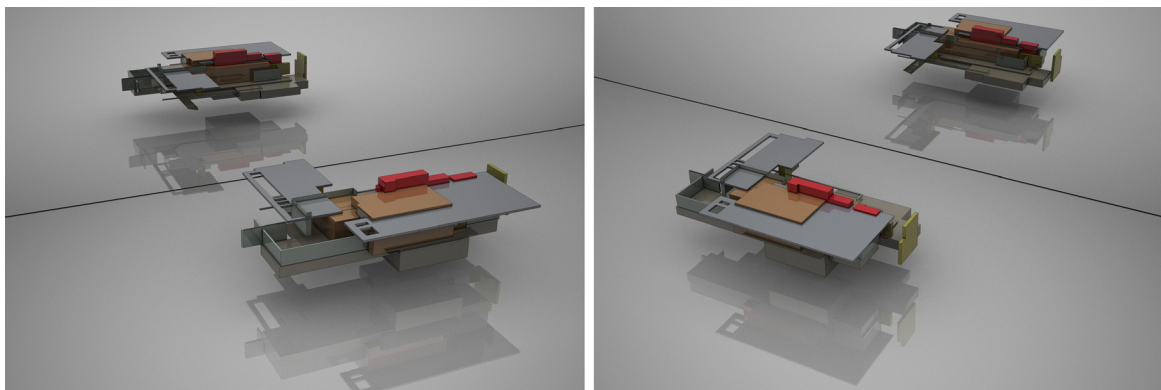


Fig 22. Vistas del modelo híbrido entre las casas Sturges y Goestch Winckler.

Terzidis⁽²⁷⁾ aporta un nuevo enfoque referido a la definición formal de los híbridos. Según él, un morphing puede ser concebido como un elemento unificador, pero también como un proceso de diversificación. El **híbrido** resultante representa un estado de la forma, donde las características de las formas originarias son unificadas y en el caso de que se continúen mezclando las formas, son traspasadas a través de las próximas generaciones, diversificándolas. Además, durante una evolución formal, pueden aparecer ciertas características especiales, es decir, destacan ciertas formas híbridas. En este sentido, los dos principios fundamentales interrelacionados para la interpretación morfológica de las formas híbridas son: por un lado, el parecido con sus formas origina-

(27) Terzidis, Kostas. 2003. Expressive form: A conceptual approach to computational design. London [u.a.]: Spon Press. p. 27.

rias y por otro lado, la autonomía de semejanza. Este último principio puede parecer un punto contradictorio, pero en realidad se refiere a la condición especial de la superposición de características propias. Es decir, cuando algo tiene su propia personalidad pero al mismo tiempo, recuerda a alguna otra cosa. En dicho caso, las semejanzas (el parecido), evolucionan en algo independiente y autónomo. Éste es el punto en la historia de la evolución cuando nacen las nuevas características predominantes, donde se redefine y diversifica el proceso de la evolución.

En relación al concepto de evolución aplicada al morphing, los modelos híbridos y su descendencia no se producen a partir de nuevas características, sino que son producidos sobre lo que ya existe. Esto se puede lograr tanto transformando un modelo originario a partir de la funcionalidad análoga, como combinando varios modelos híbridos para obtener otros modelos más complejos. Haciendo un símil con el proceso de selección natural, en el morphing la selección de características opera por medio de la manipulación del usuario para definir lo que va a realizar. En un comienzo, el usuario opera sin saber muy bien cómo va a ser la transformación. Posteriormente, con una secuencia ya programada es libre de arreglar, transformar y crear las condicionantes para que la transformación esté bajo su propósito. En este sentido, al realizar las combinaciones de las casas Usonianas, más que encontrar un modelo híbrido similar a algún proyecto de Frank Lloyd Wright (diferente a los nueve seleccionados), la técnica se limita a aprovechar todas las oportunidades que se le presentan para crear nuevas combinaciones de modelos.

5.7. Optimización del morphing arquitectónico: requisitos para un buen morphing.

Con la técnica del morphing existen un sin número de posibilidades formales para enlazar las formas intermedias en una transformación entre dos objetos gráficos. En este repertorio de formas, las técnicas de modelado permiten crear cualquier tipo de morfología transitoria, donde la elección de una morfología intermedia para crear una animación, en muchos de los casos puede que no sea del todo apropiada. Sin embargo, se darán algunos casos donde la animación del morphing presentará un desarrollo natural y un resultado satisfactorio. Centrándose en un punto de vista arquitectónico, la optimización del proceso tiene relación con la validez funcional que presentan los modelos intermedios a lo largo de la transición.

Los principios desarrollados por **Gomes et al.**⁽²⁸⁾, que ofrecen las pautas y directrices para obtener un buen morphing, se utilizarán como referencia para establecer las bases para la obtención de un resultado satisfactorio. En este sentido, estos investigadores consideraban como premisa fundamental que el resultado final de un morphing era una animación. Por esto, basan sus pautas en los principios generales para la obtención de una correcta animación desarrollados por **Lasseter**⁽²⁹⁾.

Teniendo en cuenta que estos principios eran aplicables a un tipo de morphing genérico y que fueron desarrollados a finales de los noventa, se tomarán como base; pero se readaptarán al caso específico de un morphing arquitectónico, se realizaran aportaciones basadas en técnicas actuales y se sumarán los principios que se han detectado con la experiencia práctica del autor.

En base a lo anterior, a continuación se detalla una lista sugerida de principios para la elaboración de una transformación entre objetos arquitectónicos. Estos principios son entendidos como una guía para el usuario, con el fin de obtener transformaciones más naturales y resultados satisfactorios (óptimos) con la técnica del morphing:

1.- Coherencia en la transformación de atributos y preservación de características.

Un objeto gráfico consta de una forma geométrica con atributos. Por ejemplo, en las mallas trianguladas las caras de los triángulos están asociados no sólo con la posición, sino también con otros atributos como el color, la reflectancia de la superficie, las texturas y la normal a la superficie. Estos atributos deben tenerse en cuenta para lograr la correcta representación del objeto y en el morphing deben ser transformados consecuentemente con el correspondiente atributo del objeto análogo. De esta forma, se lograría una **coherencia en la transformación de atributos**.

(28) Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, and Luiz Velho. 1999. *Warping and morphing of graphical objects*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

(29) Lasseter, J. 1987. Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. In *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* M. C. Stone, Ed. SIGGRAPH '87. ACM, New York, NY, 35-44.



Fig 23. Gomes et al. (1999). Transformación de rasgos de atributos entre la cara de una mujer y un guepardo (ojos, nariz y boca). **(Cen)** Sin características. **(Der)** Con características geométricas (posición de los rasgos).

La **preservación de características** consiste en transformar las características destacadas del objeto base con las características destacadas del objeto destino. Es necesario remarcar que existen **rasgos de atributos** y **características geométricas**. En el caso de la transformación de la cara de una mujer por un guepardo, los ojos, la nariz y la boca son rasgos de atributos. Las características geométricas a su vez, serían las cuatro esquinas del formato rectangular de la imagen, al igual que la posición espacial de los rasgos de atributos.

Una de las características importantes que se debe tomar en cuenta para su preservación en la transformación es el **suavizado o facetado (smoothness)**. Es recomendable mantener el mismo nivel de suavizado entre los modelos a transformar para que ambos objetos mantengan el estilo visual de los contornos redondeados. Este tipo de características es común en los objetos de malla, los cuales están formados por múltiples subdivisiones (triangulaciones) que definen las caras editables. Estas caras están compuestas de facetas subyacentes y en la medida en que se aumenta el suavizado de un objeto, aumenta la densidad de partición del objeto (aumentando el número de subdivisiones) y se incrementa el número de facetas que proporcionan un aspecto más suave y redondeado a la forma.

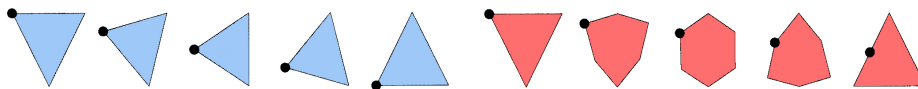


Fig 24. Preservación de características en una secuencia de morphing entre dos triángulos. **(Izq)** Vértices son transformados en vértices. **(Der)** Secuencia donde no se conservan las características de la forma. Los vértices no continúan siendo esquinas anguladas, desaparecen durante la transformación convirtiéndose en los puntos intermedios de las aristas del triángulo.

Cabe destacar, que existen excepciones en la preservación de características cuando se transforman formas geométricas en un morphing mediante el mapeado de puntos. Estas formas geométricas presentan una dicotomía entre la forma que se quiere representar y la forma editable a nivel gráfico. Esto ocurre cuando existe una diferencia en el número de vértices entre las figuras a transformar. Por ejemplo, un punto que forma parte de un vértice en una figura geométrica inicial, al realizar la transformación sigue siendo un punto a nivel gráfico. No obstante, en la representación del objeto final ya no es un vértice de la forma, sino que pasa a formar parte de una arista de la forma geométrica representada. Aunque en estos casos no se cumpla el principio de preservación de características, lo que prevalece es el criterio del usuario. Básicamente porque para realizar este tipo de transformaciones se necesita la interacción del usuario para manipular y definir la estrategia de transformación.

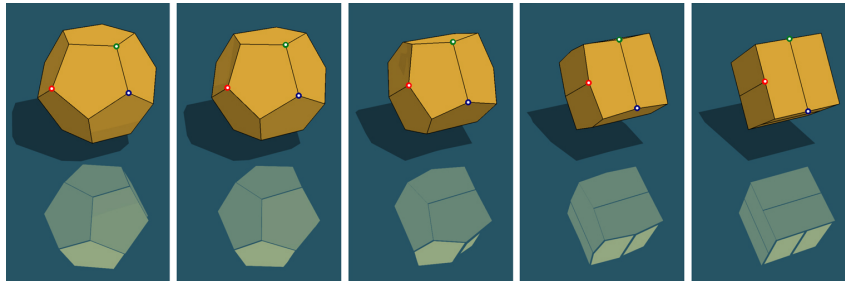


Fig 25. Secuencia de transformación entre un dodecaedro y un hexaedro. La figura inicial (dodecaedro) es coincidente tanto a nivel gráfico (puntos editables) como en su representación (vértices). La figura final gráficamente tiene el mismo número de puntos editables que un dodecaedro (veinte puntos), pero representa un hexaedro (seis vértices). Algunos vértices del dodecaedro pasan a ser puntos medios de la arista del hexaedro y algunas aristas pasan a pertenecer al plano que forman las caras del hexaedro.

2.- Preservación de la Topología o evolución topológica paulatina.

En topología dos cuerpos se consideran **homeomorfos** si tienen la misma forma. Si las formas de los objetos gráficos que interactúan en el morphing son homeomorfos, se debe **preservar la topología** del objeto base durante la transformación. En un morphing entre una jarra con asa y un toro (donut), al ser homeomorfos se pueden igualar entre ellos estirando, compactando y deformando sin realizar algún recorte o perforación en su forma.

La transformación entre dos objetos homeomorfos es recíproca. Es decir, se puede ir desde el objeto inicial hacia el final y viceversa, siendo un proceso de ida y vuelta continuo en ambas direcciones.

En el caso de una transformación entre objetos topológicamente diferentes (no homeomorfos) no es posible preservar la topología, por lo que es necesario realizar una **evolución de topología**. Esta evolución topológica implica la utilización de una cirugía que altera la topología de una de las formas, mediante operaciones de corte, pegado, agujereado (perforación) y pinchado.

Es importante que la evolución topológica logre una **transformación paulatina**, consistiendo en: que se eviten saltos discontinuos en la forma, que no ocurran cambios topológicos no deseados, que no se presenten etapas intermedias excesivamente distorsionadas y que las formas intermedias transitorias de la cirugía existan en un solo punto en el tiempo.

3.- Preservación de la rigidez.

La rigidez se refiere al nivel de restricción que se aplica a las propiedades geométricas de las formas durante la transformación. Estas propiedades geométricas pueden ser entre otras la volumetría, los ángulos y la con-

vexidad⁽³⁰⁾.

En casos con condiciones muy restrictivas, se realiza la transformación a través de un grupo de isometrías sobre la forma del objeto. Este tipo de transformación mantiene las propiedades geométricas anteriormente expuestas, así como la distancia entre los puntos que determinan la forma. En esta categoría se encuentran todas aquellas transformaciones geométricas formadas por traslaciones, rotaciones y reflexiones que no alteran las distancias entre los elementos que configuran la forma.

Cuando existen condiciones con menor restricción de rigidez, las propiedades geométricas como la volumetría, ángulos y convexidad pueden variar independientemente o en conjunto.

En un contexto general, es el usuario el que definirá el **nivel de rigidez a preservar** en función de la transformación deseada basándose en las propiedades geométricas de las formas.

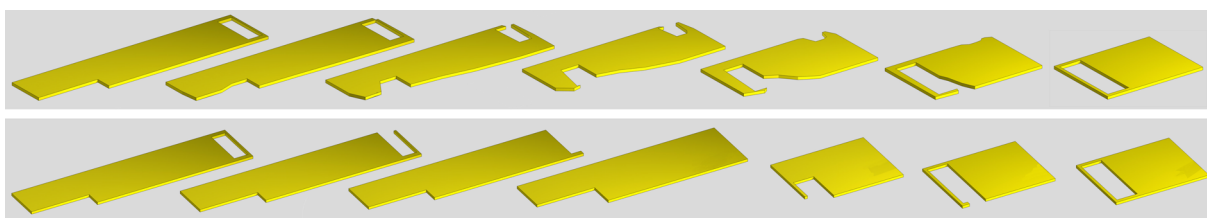


Fig 26. Preservación de la rigidez. **(Arr)** Sin restricción de ángulos. **(Ab)** Con restricción de ángulos, manteniendo la ortogonalidad de las formas.

Un caso particular con una condición de rigidez bastante fuerte, ocurre en la técnica implementada por **John Lasseter**⁽³¹⁾ llamada **aplastamiento y estiramiento** (*squash and stretch*). La regla primordial de esta técnica es que no importa qué tan aplastado o alargado se logre deformar un objeto en particular, su volumen debe permanecer constante (cantidad de masa del cuerpo o área de la figura). Esta técnica ocurre frecuentemente en una transformación animada y también pueden ser aplicado al morphing.

4.- Monotonicidad.

El volumen, las áreas o partes del objeto deberían cambiar monótonamente. Este concepto está asociado a una uniformidad que debería mantenerse durante toda la transformación.

(30) La convexidad de una curva o una superficie, es la zona que se asemeja al exterior de una circunferencia o una superficie esférica; es el concepto opuesto a la concavidad. En una figura convexa se puede ir de cualquier punto a cualquier otro en vía recta, sin salir de la misma.

(31) Lasseter, John. 1987. Principles of traditional Animation Applied to 3D computer Animation. computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings), 21(4), 35-44.

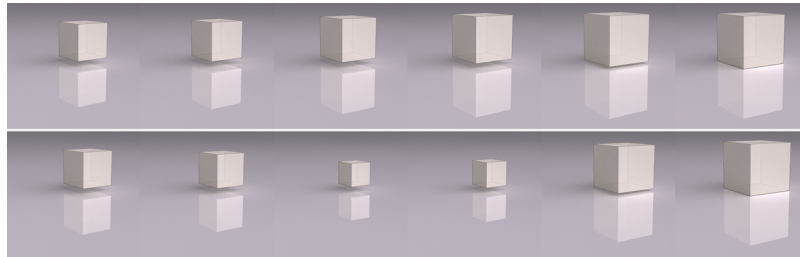


Fig 27. Transformación entre hexaedros regulares. **(Arr)** Morphing monotónico, aumento constante de la volumetría hacia un objeto mayor. **(Ab)** Morphing no monotónico, la volumetría disminuye hacia un objeto con menor volumen y posteriormente hacia la volumetría mayor.

5.- Evitar la linealidad

Se considera que en un morphing se utiliza la “linealidad” en la transformación, cuando se desarrolla la interpolación lineal, la transformación bilineal y el fundido uniforme (cross-dissolve), entre otros. Este tipo de interpolación no logra buenos resultados en el cálculo de transformaciones cuando existe una trayectoria rotatoria entre dos segmentos. Esta trayectoria de los elementos debe ser curva, ya que si se realiza con la interpolación lineal, la forma no conserva su magnitud y las formas intermedias varían su dimensión por la posición de los vértices en los segmentos intermedios. Por lo tanto, se debería evitar este tipo de técnica simplificada de transformación, pudiendo ser utilizada sólo si se tiene suficientes razones para hacerlo.

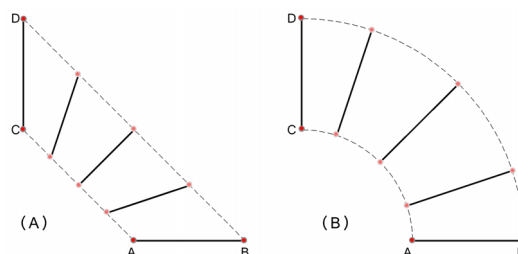


Fig 28. Secuencia de morphing entre los segmentos AB y CD. **(A)** Interpolación lineal. **(B)** Trayectoria rotatoria.

6.- Utilización de grupos de transformación.

Desde un punto de vista matemático, la transformación de los objetos gráficos consiste en una transición entre las formas y los atributos de dos objetos. Muchas veces la forma del objeto de destino se obtiene de la forma del objeto de origen, utilizando una transformación que pertenece a algún **grupo de transformación del espacio**. Un **grupo de transformación** satisface características de: asociatividad, elementos identificativos y elementos inversos. Para una transformación entre los objetos (origen y destino), se debería utilizar un **parámetro clave** del grupo de transformación que contenga la transformación. La transición se consigue por una serie concadenada de transformaciones desde un objeto al otro. Esta noción de continuidad puede ser matemáticamente descrita utilizando un **parámetro** de la familia de transformaciones (Por ejemplo, familia de

rotaciones, familia de giros, etc).

7.- Entradas y Salidas Lentas (*Slow In and Slow Out*).

En las primeras animaciones, la acción estaba limitada principalmente a movimientos rápidos y lentos. La continuidad uniforme entre fotogramas estaba determinada por el intervalo de duración entre una figura y la siguiente. Cuando en la animación con fotogramas claves se empiezan a utilizar figuras con más expresiones cambiantes, se descubre que al utilizar transitoriamente una figura clave intermedia, se puede lograr un resultado más animado acelerando el centro de la acción y haciendo más lentos el principio y el final. Así, una figura se puede transformar rápidamente de una expresión a otra, “saliendo lentamente” de una postura y “entrando lentamente” a la postura siguiente.

Lo primordial de esta técnica es que se ocupa del intervalo que definen las formas intermedias y su sincronización entre formas extremas. Lo que se busca es alterar la coordinación de la animación para que la acción se ralentice alrededor de los cambios importantes en la forma.

En la mayoría de los sistemas de animación 3D con fotogramas clave, los fotogramas intermedios se calculan de forma automática. El control de los cambios en los fotogramas clave está regulado por un editor de tiempo que está representado mediante la interpolación de una spline. Según la interfaz gráfica de cada programa (*GUI: graphics user interfaces*), en la representación gráfica de esta spline, se puede modificar la tensión, dirección, tendencia y continuidad de ésta. La **entrada y salida lenta** se logra mediante el ajuste de estos parámetros.

8.- Contribución del espacio escénico.

El espacio escénico es el lugar donde se representa la transformación de los objetos. Básicamente este escenario se puede constituir con un plano base (suelo), unos planos de fondo y una iluminación apropiada. El morphing influye en el espacio escénico donde está situado. De esta forma, el objeto posee sombra y puede llegar a crear reflejos en su entorno. Cuando las condiciones de iluminación del morphing generan una única sombra, ésta sirve de referencia y apoyo en la percepción de la transformación del objeto. En cambio si las condiciones de iluminación generan más de una sombra, pueden llegar a confundir la percepción del usuario. Por otra parte, los planos que definen el espacio escénico pueden estar constituidos por un material reflectante, de forma que puedan crear reflejos que muestren otras vistas del objeto en transformación.

9.- Equivalencia de la volumetría funcional y ubicación espacial durante el morphing.

Los principios anteriores se han centrado principalmente en la transformación de una forma genérica y sus características gráficas. En el caso de la forma arquitectónica, se puede plantear que los volúmenes que la constituyen poseen adicionalmente una función programática definida por el usuario. Esta característica añadida viene condicionada desde el estudio del programa arquitectónico de ambos modelos a transformar.

Así, a la hora de plantear la transformación volumétrica se establece una equivalencia entre los espacios del proyecto arquitectónico que poseen la misma función. En el caso concreto de las casa Usonianas, se trataría de asociar volumetrías análogamente funcionales (chimenea-chimenea, cocina-cocina, etc).

No obstante, esta metodología en el morphing permite cierta flexibilidad. Esto significa que a falta de correspondencia funcional entre volúmenes, ésta puede establecerse siguiendo otros criterios como pueden ser la similitud en las formas o la proximidad análoga dentro de la volumetría de los modelos originarios.

Las correspondencias entre los volúmenes funcionales descritos anteriormente deben ser transformados siguiendo un ritmo de cambio coherente a la cantidad de modificaciones a realizar, tanto en el caso de los cambios significativos como de menor jerarquía. Esto permite que no se produzcan desfases de forma desmedidos y la forma de transición mantenga siempre un sentido arquitectónico funcional a lo largo de la transformación.

En el caso de que existan elementos con diferente carga de cambios significativos, es conveniente sincronizar la transformación conjunta de los cambios en los elementos. Esto se consigue una vez que la transformación está analizada y demarcada. Se trataría de identificar cuáles son los cambios claves significativos en cada uno de los volúmenes, definiendo en qué momento comienzan e intentando que coincidan en el mismo punto temporal. De esta forma se pretende que las transformaciones principales comiencen en el mismo momento, aunque las transformaciones menores de algunos objetos puedan comenzar anteriormente o posteriormente.

Por último, existen casos donde los objetos no sólo necesitan ser transformados, sino también que sean reubicados dentro del espacio de representación.

6.- CONCLUSIONES.

6.1. Análisis histórico.

La transformación entre objetos gráficos constituye una operación básica para la interacción visual en los ordenadores. De igual forma sucede con las técnicas de warping y morphing que son por esencia, las operaciones de modificación fundamentales en los gráficos por ordenador. Estas técnicas provienen de los primeros avances para el tratamiento automático de la información, desarrollado mediante métodos gráficos para el procesamiento y corrección de distorsiones, aberraciones y transformaciones geométricas.

En su estreno del año 1982, la técnica del morphing generó gran impresión en la comunidad gráfica pero no logró demasiado interés entre los entendidos en el tema. Sin embargo, a mediados de los ochenta las exitosas compañías de efectos especiales vieron su potencial y comenzaron a desarrollar la técnica para imagen y video. Muchas de las técnicas desarrolladas para morphing tridimensional fueron adaptaciones de las técnicas de morphing para imagen y video. El interés de los investigadores por el morphing 3D comenzó a finales de los ochenta. Esto se debió a que el morphing 2D tenía desventajas en ciertos aspectos visuales con relación al morphing en 3D. Uno de estos aspectos era la dependencia que tenía el morphing 2D respecto al ángulo de visión y los parámetros de iluminación de una escena. Cuando se trataba de manipular objetos

tridimensionales, los algoritmos para morphing 2D no lograban interpolar la complejidad de los objetos 3D. Estos algoritmos no eran capaces de manipular modificaciones en los ángulos de la cámara y puntos de vista o cambiar parámetros y condiciones en la iluminación. Por lo tanto, el usuario perdía flexibilidad para modificar objetos tridimensionales y no podía modificar fotogramas intermedios de la secuencia con relación a estos parámetros.

En la década de los noventa, el morphing se convirtió en la técnica protagonista del estado del arte de los gráficos para efectos especiales, situándose entre los elementos técnicos que definieron el estilo visual de dicha década. Posteriormente, a mediados de la década pasada, el campo de acción de la técnica del morphing llegó a un estado de madurez. Esto se debió a la acumulación y mejora sostenida de diferentes técnicas, junto con el desarrollo específico de los recursos gráficos. Estas mejoras permitieron consolidar una base de actuación que facilitó la utilización global de la técnica. Asimismo, proporcionaron una base conceptual común que fue asimilada y compartida por los investigadores de la técnica. Muchas de estas mejoras fueron aplicadas de forma específica en algunas áreas científicas. Sin embargo, en el ámbito arquitectónico las implementaciones demoraron tiempo y en muchos de los casos pasaron desapercibidas, debido a que no fueron desarrolladas en el ámbito del diseño arquitectónico o simplemente no se encontró la conveniencia para su utilización.

En sus comienzos (finales de los ochenta) la utilización del morphing para arquitectura llegó retardada y bastante elemental en comparación con el resto de disciplinas. En ese momento se emplearon los primeros programas comerciales de morphing 2D. Fue a finales de los noventa y comienzos de la década pasada, que la técnica del morphing 3D para arquitectura logró una mayor especialización. Esta mejora se debió al uso de programas de animación que implementaban esta técnica. Su utilización creó toda una nueva terminología relacionada con la intencionalidad y especificación del proceso de transformación (Eisenman y Kolatan & Mac Donald). Además, se desarrolló un variado léxico arquitectónico para definir el procedimiento proyectual, aunque muchas de estas operaciones precisaban lo realizado de una forma bastante genérica y figurada. Así, a nivel técnico las explicaciones eran mínimas, dejando el mayor protagonismo al resultado visual. Una mención aparte merece Kostas Terzidis, uno de los pioneros en el uso del morphing para arquitectura. En 1989 mencionó esta técnica con otro nombre (reformas) y publicó una serie de ejemplos muy adelantados para la época. En sus posteriores artículos y libros siempre desarrollaba material gráfico renovado, sin embargo, la única carencia en sus escritos era una reducida información técnica especializada, superponiendo una predilección por obtener resultados inesperados sobre un resultado intencionado.

En la actualidad, la técnica del morphing es fundamental para los gráficos por ordenador. De cierta forma, es una técnica elemental que sigue vigente y en desarrollo, evolucionando en conjunto con los nuevos avances, sirviendo como técnica de asistencia y soporte a las aplicaciones innovadoras.

6.2. Tipos y características de los objetos gráficos.

El ordenamiento y clasificación de cada una de las técnicas de morphing es un asunto complejo. Existen infinidad de técnicas que pueden variar según el tipo de objeto, su adquisición y conversión, la correspondencia, su interpolación, el algoritmo utilizado, etc. Si bien los estudios generales realizados para técnicas de morphing 3D y 2D dan ciertas pautas a la hora de clasificar las diversas técnicas, existen muchas de éstas que no encuentran un sitio para ser clasificadas.

Las características gráficas y el tipo de representación del objeto a transformar condicionan fuertemente los principios en que se basan cada uno de los métodos de morphing revisados, junto con la capacidad que tiene el usuario para controlar la secuencia de transformación. A modo general, los objetos gráficos utilizados para una transformación tridimensional se pueden describir mediante su volumen (volumetrías de un conjunto de datos) o por medio de primitivas geométricas.

Una representación volumétrica del objeto es descrita por una entidad gráfica que proporciona un valor en cada punto del espacio 3D del objeto. Esta entidad gráfica se obtiene mediante la evaluación de una función analítica específica o por la recuperación del valor (scaneado) de las muestras discretas almacenadas en una rejilla 3D. Si bien en la industria gráfica en general los métodos volumétricos no son tan populares como los formatos determinados por la utilización de superficies poligonales, una representación de **objetos volumétricos** es ideal para modelar el comportamiento de los objetos con estructuras interiores complejas. Éste sería el caso del estudio interno del cuerpo humano en medicina.

En general, los métodos volumétricos no presentan restricciones topológicas ni geométricas, pudiendo transformar fácilmente objetos de diferentes géneros topológicos (por ejemplo, una esfera en un toro). Además, a diferencia de los métodos de superficie, no presentan dificultades en la manipulación de la estructura interna vinculatoria (vértice/arista/cara), ni presentan problemas de auto-intersecciones. No obstante, una de las insuficiencias que ha ido mejorando a través del tiempo es el control detallado para determinar la correspondencia de características y la transición controlada de las formas intermedias. A nivel visual, algunos de estos enfoques tenían cierta pérdida de calidad gráfica debido a la complejidad en la conversión visual y en los elevados cálculos para representar estas formas. En muchas de estas implementaciones, los motores de visualización reproducían modelos con formas suavizadas y no permitían la visualización de modelos con caras terminadas en aristas. En otros casos, la representación de los modelos volumétricos se realizaba mediante una conversión en polígonos. Este proceso demoraba un cierto tiempo, que sumado al gran número de elementos en los modelos volumétricos, hacía que las secuencias de transición fueran demasiado lentas para aplicaciones interactivas. No obstante, la demora que producía la conversión del modelo podía ser contrarrestada por la sencillez de los algoritmos utilizados en las representaciones volumétricas.

Una de la peculiaridades en la mayoría de algoritmos volumétricos era que no necesitaban un mapeado biyectivo entre los vértices de los modelos de origen y destino, como ocurre con las técnicas de morphing basadas en frontera. Además, el morphing volumétrico se podía aplicar fácilmente a representaciones de frontera (mallas) mediante la conversión en datos volumétricos o superficies implícitas. Sin embargo, la operación

inversa podía resultar en topologías que eran difíciles de transformar.

Los modelos de fronteras están representados por cualquier modelo de superficie gráfica. En general, las superficies poligonales (mallas) son de uso común y tienen ciertos beneficios respecto a los modelos volumétricos. Esto se debe a que se trabaja directamente con la representación del modelo, ahorrando tiempo en la conversión de éste. La mayor limitación de los métodos de morphing basados en la **representación de fronteras** era que por lo general, los modelos originarios (inicio y destino) debían compartir la misma topología. Es decir, debían tener el mismo género topológico. Por otra parte, la definición de las formas intermedias implicaba un alto costo en el cálculo, de la misma forma que si aumentaba el número de vértices, el control de la transformación podía necesitar grandes cálculos para modelos complejos.

El uso de las representaciones de fronteras posee varias ventajas. Por un lado, las estructuras de datos correspondientes son más compactas que el almacenaje de objetos voxelizados. Por otro lado, existen muchos algoritmos prácticos y eficientes que están disponibles para su visualización. Además, presentan mayor facilidad para implementar características o propiedades tales como color, texturas de contorno o la normal a un punto. Por último, estas técnicas permiten un alto control sobre la transformación, donde la correspondencia de características puede ser establecida relacionando mallas análogas o conectando vértice con vértice en las formas originarias. Como contrapartida, las representaciones de frontera son bastante limitadas y rígidas. Esto significa que cambiando incluso un par de valores en la estructura de datos al azar o modificando el número de caras o las coordenadas de puntos de control, puede resultar un objeto sin validez. Adicionalmente, la estructura de datos modificada puede no corresponder a algún objeto representable y como consecuencia, el morphing se transforma en un cálculo más complejo.

6.3. Problemática del procedimiento.

En un morphing entre dos formas, existen infinitas transformaciones entre ellas. A nivel técnico, la discusión sobre la problemática en el procedimiento de transformación se basa en tres categorías: control de usuario, el establecimiento de correspondencia y la interpolación.

- El **control de usuario** permite a los animadores especificar qué partes o características se convertirán desde la forma inicial a la final. El morphing debe ser fluido y debe mantener la relación el mayor tiempo posible con las formas originarias durante la transformación. Por esta razón, el tipo de control de la transformación por parte del usuario es una importante característica en una herramienta de morphing. Este control debe ser intuitivo, no demasiado pesado y adaptado al conocimiento del usuario.

El automatismo en la mezcla de las formas originarias es una opción practicable si los pasos intermedios (key-shapes) son mínimos. Con el uso del **automatismo es más factible obtener formas intermedias inesperadas**. El control de usuario para determinar las formas de paso, sigue una lógica relacionada con la morfología (tamaño, escala, geometría) y la topología (iguales o distintas).

Se deben considerar las formas de paso (clave) como formas directoras del proceso, pero en ningún caso formas directoras que guían la transformación en el total del proceso. Las formas originarias (inicio y destino) influyen a las formas claves de forma gradual a lo largo del proceso. Existe un **punto en el que se debe producir el cruce** entre la influencia de una forma y otra, pudiendo estar este cruce más cerca de una forma que de otra. Ese punto intermedio no debería tener asociada una forma clave y **lo debería administrar el usuario, siendo el cálculo responsabilidad del sistema informático**.

- El **establecimiento de correspondencia** transforma o mapea los elementos superficiales desde la forma inicial a la final. Algunos métodos permiten al usuario colocar puntos o elementos característicos análogos a ambas formas originarias, con el fin de controlar la transformación animada.

El grado de definición del modelo gráfico (geométrico y topológico) es directamente proporcional al grado de dificultad y trabajo para desarrollar el morphing. Con un menor grado de definición del modelo gráfico es más fácil trabajar a un nivel de tipologías formales. En la medida en que se va definiendo más el modelo gráfico, aumenta el detalle de los elementos y aparecen un mayor número de elementos constitutivos arquitectónicos. Estos elementos deberán tener una correspondencia en el proceso de transformación y en consecuencia, una mayor carga de trabajo, si no se cuenta con procesos automatizados.

- La **interpolación** se refiere a la transformación de los elementos superficiales correspondientes. En esta categoría es necesario un nivel específico de conocimiento, por lo tanto no se harán comentarios.

6.4. Resumen y comentario respecto de las implementaciones revisadas.

En sus inicios, las primeras implementaciones de **objetos volumétricos** proporcionaban automáticamente la correspondencia para la transformación. Si bien los modelos resultantes no poseían una buena resolución, estas primeras implementaciones estaban ligadas a sistemas de adquisición volumétrica (scanner 3D) y la utilización de modelos voxelizados. Posteriormente, las técnicas evolucionaron hacia una correspondencia interactiva (interacción del usuario) sin dejar de lado el automatismo. Estos trabajos presentaban mejoras en la resolución e incluían el modelado de los objetos a utilizar en la transformación. Wyvill *et al.* (1994-97-99) y Galin *et al.* (1996-99) mejoran el modelado con blobs utilizando operaciones booleanas y deformaciones, creando objetos en base a composiciones y utilizando un árbol de instrucciones compositivas. De la misma forma, Larios *et al.* (1995) utilizan campos de influencia de primitivas, donde el usuario especificaba rasgos de correspondencia definiendo la forma de los objetos a transformar mediante parejas de elementos puntuales, lineales y volumétricos. El uso de campos distantes en objetos voxelizados de Cohen-Or y Levin (1998) tenía la capacidad de transformar objetos con diferente género topológico, además de permitir anclar un número menor de puntos característicos para establecer la correspondencia entre formas.

Posteriormente se desarrollan las técnicas basadas en esqueleto, ya sea mediante láminas como los de Blanding *et al.* (2000) o mediante primitivas poliédricas de Xiang *et al.* (2001). La particularidad de estas últimas era que podían generar modelos complejos con formas libres a partir de un número menor de esqueletos. Utilizando una mezcla de campo donde el usuario introducía ciertas restricciones y formas de influencias, se podía realizar un morphing 3D entre formas arbitrarias. Jin *et al.* (2005) proponen una técnica mixta utilizando blobs para la combinatoria y correspondencia de las formas, junto con mallas poligonales para su representación. Mediante una estructura jerárquica de árbol-esfera se establecía la correspondencia entre los blobs originarios. Los centros de estas esferas eran localizados en el eje medio, el cual definía su esqueleto y daba la información sobre la topología y geometría del objeto a transformar.

Desde las primeras implementaciones de morphing para **objetos basados en fronteras** la correspondencia podía ser especificada tanto por el usuario como de forma automática. Chen y Parent (1989) desarrollaron una técnica para definir formas promedio, de forma que la correspondencia se establecía en base a las propiedades geométricas de los objetos, junto con particiones que tuvieran un significado y sentido entre los modelos. Lazarus y Verroust (1994-97) realizaban la correspondencia entre modelos, a partir de una malla adicional definida en base a cilindros que lograban aproximar la forma del objeto y sus características destacadas. De la misma forma, DeCarlo y Gallier (1996) utilizaban una malla de control superpuesta a la forma para definir la correspondencia, debiendo el usuario definir la malla y asociar una a una las caras de ambos objetos a transformar. Gregory *et al.* (1998) presentaron una técnica similar, donde el usuario debía tener especial cuidado para especificar las mallas de control y las equivalencias en ambos objetos. La interacción del usuario contaba con una gran carga de trabajo. Por otra parte, Kanai *et al.* (1998) generaban una correspondencia automática entre objetos, mediante la descomposición de las mallas triangulares, las cuales proyectaban la forma en discos planos circulares que concentraban la estructura gráfica del objeto para su correspondencia. Igualmente Shlafman *et al.* (2002) transforman superficies poliédricas, mediante la descomposición de éstas

en parches que eran proyectados en formas de discos planos. También proponían la descomposición de los modelos en parches con formas cilíndricas. Marc Alexa (2000) propone una transformación entre poliedros en base a rasgos característicos de ambos modelos. Se definían puntos correspondientes, los cuales era mapeados y proyectados en unas esferas que se superponían y deformaban para hacer coincidir los puntos característicos y lograr la transformación.

Lee *et al.* (1999) presentan un método que permitía transformar mallas triangulares homeomorfas utilizando una gran número de características. La particularidad de esta técnica era que permitía transformaciones con una buena calidad visual en mallas de gran tamaño y detalle. Otra tipo de técnica que proporcionaba distintos niveles de detalles en tiempo real era la que proponía Christopher Zach (2002). Esta implementación permitía obtener animaciones fluidas en escenarios virtuales con diferente nivel de detalle según la posición más cercana al encuadre. La técnica del morphing era utilizada para encontrar la correspondencia de vértices y las transiciones entre sectores con mejor o mayor calidad en el detalle de la imagen.

Zöckler *et al.* (2000) realizan una interesante técnica para los modelos de superficie. Esta técnica consistía en transformar superficies trianguladas con distintas topologías entre sí. Para esto, las correspondencias se realizaban de forma interactiva sobre el modelo, trazando parches (particiones) sobre la superficie que la dividían. Esta división descomponía el modelo automáticamente manteniendo la correspondencia, a su vez que los empalmes de borde eran auxiliados con la especificación de puntos característicos para mantener la cohesión entre particiones. Esta aplicación ofreció un control simple e intuitivo para el usuario, permitiéndole animar secuencias de cierta dificultad en un tiempo relativamente corto. Otra técnica importante de mencionar era la de Kaneko y Okada (2008), la cual permitía transformar objetos independientemente del número de vértices y con topología dispar entre ellos. La técnica se basaba en la definición del esqueleto de la forma utilizando un mapeado baricéntrico. En primer lugar, el usuario segmentaba (particionaba) manualmente los modelos y posteriormente, el sistema definía la estructura de huesos generados para crear el esqueleto de los modelos y mantener la cohesión. La correspondencia era determinada en cada una de las particiones mediante la proyección en discos planos circulares (mapeado baricentrico) entre los modelos. Todo el proceso era automático, con excepción de la partición de los modelos.

De todas estas implementaciones revisadas, la mayoría no han sido utilizadas para la arquitectura. Existen un sin número de técnicas puntuales que sólo solucionaban un problema específico relacionado con la correspondencia, el control de usuario, la topología o la representación de los objetos; entre otros. De igual manera, si se aplicaran para arquitectura solucionarían casos puntuales relacionados con su transformación. En este sentido, lo que se valora más en una técnica de morphing es que pueda ser lo más generalista posible, de forma que pueda solucionar un mayor número de problemas específicos relacionados con las transformación de la forma.

Las técnicas de **morphing volumétrico** al ser en sus comienzos utilizadas en medicina, estaban muy relacionadas con los sistemas de adquisición de la forma (scanner, tomografías). En este sentido, estas técnicas pueden estar más relacionadas a un proceso de diseño arquitectónico en que se trabaja con maquetas reales, pudiendo utilizar el modelo virtual para ir evolucionando los diseños o ir comparándolos y promediándolos entre ellos. En cierta forma, estas técnicas estarían vinculadas con el diseño industrial o el diseño de prototipos que necesiten una evolución formal en su proceso de diseño. En general, la técnicas volumétricas trabajaban sobre modelos

con cierto grado de detalle o formas que estaban definidas a partir de operaciones booleanas o estructuradas con un árbol de instrucciones. Todas estas operaciones eran utilizadas para el diseño objetos aislados, sumado a que no presentaban problemas con los cambios de topología y tenían la correspondencia automatizada.

Las técnicas de morphing para **objetos basados en fronteras** parecen ser las más apropiadas para arquitectura. Poseen mayor desarrollo en el control de la correspondencia, así como han desarrollado técnicas para el control de la multi-resolución o modelos en tiempo real con diferentes niveles de detalles. Por otra parte, la gran deficiencia que tenían (las transformaciones entre topologías distintas) han sido solucionadas y en algunos casos, presentan automatismos para no sobrecargar el trabajo del usuario a la hora de generar correspondencia entre objetos.

Las dos últimas técnicas de Zöckler *et al.* y Kaneko & Okada debido a sus características eran las más apropiadas para ser utilizadas en arquitectura. El poder particionar o segmentar (dependiendo del caso) el modelo, permitiría transformar edificios con formas mucho más libres. En este sentido, en una arquitectura con superficies lisas y continuas sería difícil determinar los elementos que configuran la obra arquitectónica, sobre todo por que las funciones estructurales tienden a ser indeterminadas y los límites de donde acaba un elemento y donde empieza otro no son exactas. Para este tipo de arquitectura es necesario utilizar un sistema de control mediante componentes. El particionar la forma permite descomponer el modelo global y controlar un grupo de primitivas locales por medio de márgenes, los cuales funcionan como cinturones conectados y mantienen la unidad del modelo. En este sentido, la capacidad de transformar modelos independientemente de su topología, ofrecía aún más libertad para el control y diseño de la transformación. En el caso de Kaneko & Okada, podrían mejorarse los automatismos con un control de ayuda manipulado por el usuario con el fin de realizar las correspondencias y poder reconfigurar las transformaciones.

6.5. Consideraciones para un proceso arquitectónico combinatorio.

La forma como fin desemboca inevitablemente en un formalismo. La intención de transformar una forma es el hecho de pensar un modelo. Este modelo se caracteriza por ciertas condicionantes internas. En la medida que no se interioricen estas condicionantes dentro del proceso transformador, el proceso será meramente un **formalismo**.

La técnica del morphing es de tipo experimental transformativa (no es de tipo generativa). Desde un comienzo se advertía que la técnica del morphing era capaz de satisfacer las necesidades de transformación entre dos formas establecidas. Sin embargo, el cuestionamiento de cómo debía ser un morphing arquitectónico (*¿Qué mezclar? ¿Cómo mezclar?*), centró el interés no sólo en la manipulación morfológica de los objetos sino también en cómo esos objetos eran clasificados y caracterizados para el uso arquitectónico y no para otro tipo de disciplina. En este sentido, el valor comparativo que adquirirían los objetos formales para ser utilizados en un morphing de arquitectura, venía dado por la función arquitectónica.

Este precedente entra la forma y su función tiene su afinidad a nivel histórico con la idea de la analogía biológica en arquitectura⁽¹⁾. De esta misma forma operaban los sistemas de clasificación utilizados por Durand (como por ejemplo los estudios de teatros), donde realizaba estudios de taxonomías arquitectónicas, poniendo distintos edificios con distintas formas pero con la misma función y a una misma escala. Philip Steadman⁽²⁾ apunta que dejando de lado la descripción histórica y el análisis científico, el interés práctico de la clasificación en arquitectura, reside en la expectativa de que el ordenamiento del repertorio edificatorio del pasado, posibilitará entender principios teóricos aplicables al diseño de nuevos edificios, con nuevas formas ajustadas a nuevos programas y circunstancias.

En relación a la combinación de formas, la técnica del morphing permite mezclar **cualquier forma de arquitectura que pueda ser modelada mediante graficos por ordenador**. Sin embargo, se deben **realizar ajustes** a las formas originarias, como igualar características en el **número de puntos** (según el programa), elegir una **posición espacial similar** (centro de coordenadas de la transformación), igualar escalas y emparejar elementos de ambos modelos.

La forma en su generación posee propiedades geométricas (modelado), pero cuando se transforma en el proceso del morphing, las propiedades geométricas pasan a un segundo plano y es **la topología** la que **predomina y determina** las características de **la forma transitoria** (mapeados de puntos). La geometría es empleada como generador/modelador de la forma, mientras que la topología se emplea como elemento cohesivo de la forma transitoria. Los elementos originarios (inicio y final) son las formas geométricas que determinan el inicio y final del morphing, no obstante existe una **tercera forma** que es adicional, que es la forma transitoria de la transformación, aquella que comparte (o no) la topología de ambos elementos originarios.

El uso de la técnica del morphing es favorable: entre **tipos de arquitectura** similares (misma función) por

(1) Collins, Peter. 1981. Los ideales de la arquitectura moderna :Su evolución (1750-1950). 5ª ed. Barcelona: G. Gili. pp. 151-160.

(2) Steadman, Philip,. 1982. Arquitectura y naturaleza : Las analogías biológicas en el diseño. Madrid: H. Blume. p. 46.

ejemplo: vivienda unifamiliar, teatro, cines, etc. Igualmente, ocurre cuando la forma tiene el **mismo programa arquitectónico**. Estos casos se ven favorecidos cuando se emparejan los mismo espacios o áreas programáticas dentro de la combinación transformativa (no tiene mucho sentido la transformación cuando tienen la misma tipología formal).

6.6. Sobre Wright-Usonian y el morphing.

Las casas Usonianas han sido propicias para experimentar y explorar el uso de la técnica del morphing. Existen una serie de razones que justifican su elección y que básicamente se refiere a su diseño:

- La simpleza del diseño y volumetría de las casas, facilitaban la configuración del modelo a transformar en elementos constituyentes menores.
- La utilización de un desarrollo del programa similar en todas las viviendas (tipología programática y formal), permitía igualar emparejando volumetrías con las mismas funciones en ambas formas originarias.
- La utilización de una modulación espacial permitía identificar las formas originarias conjuntas, donde cada volumen de la composición se emparejaba con otro volumen similar en función de la otra modulación.
- Eran geometrías ortogonales, siendo la edición de los mapeados de puntos correspondientes simples de realizar.
- En el diseño de las casas existía una diversidad de formas topológicas, lo cual dificultaba la operatoria de transformación, pero a su vez hacía interesante el procedimiento. Para realizar una evolución topológica, se hacía un mapeado correcto de vértices con el fin de asimilar la topología que se requería.
- En relación a la variable forma/función, la técnica del morphing se ve favorecida porque en el caso de las Usonianas, la morfología de las casas va adquiriendo distintos valores para una misma funcionalidad.

En la línea de lo comentado anteriormente, a la hora de seleccionar las casas Usonianas utilizadas en el repertorio de los modelos de estudio, las casas estaban determinadas en base a tres características principales: su tipología, su topología y su geometría volumétrica. Dentro de las nueve casas seleccionadas, existían ciertos subgrupos con tipologías espaciales y planimétricas en forma de "L" (Jacobs I, Pope Leighey y Rosenbaum), en forma de "T" (Gordon), plantas lineales (Goestch Winckler y Pauson) y plantas concentradas (Pew, Sturges y Boomer). Topológicamente muchas de las casas poseían aberturas en su cubierta lo que podía derivar en alguna evolución o cirugía topológica (Sturges, Rosenbaum, Pope Leighey, Pew, Goestch Winckler y Gordon). En cuanto a la casa Boomer, presentaba rasgos particulares con su geometría triangulada. De la misma forma y a nivel volumétrico, la casa Pauson destacaba por su forma compacta y alargada. Compositivamente las casas Sturges, Gordon y Pew destacaban por su diversidad formal. Por último, las casas Pope Leighey, Goestch Winckler y Jacobs I destacaban por su simplicidad formal y en menor medida, lo hacía la casa Rosenbaum.

La diversidad de los distintos modelos planteó la necesidad de realizar un cuadro explicativo de cómo serían las treinta y seis posibles combinaciones entre las casas. En este sentido, las mezclas de los modelos presentaban los mismos resultados, tanto para el orden combinatorio origen/destino como en el sentido contrario. Por ello, debido a que el orden no altera el producto, existen treinta y seis combinaciones posibles y no setenta y dos.

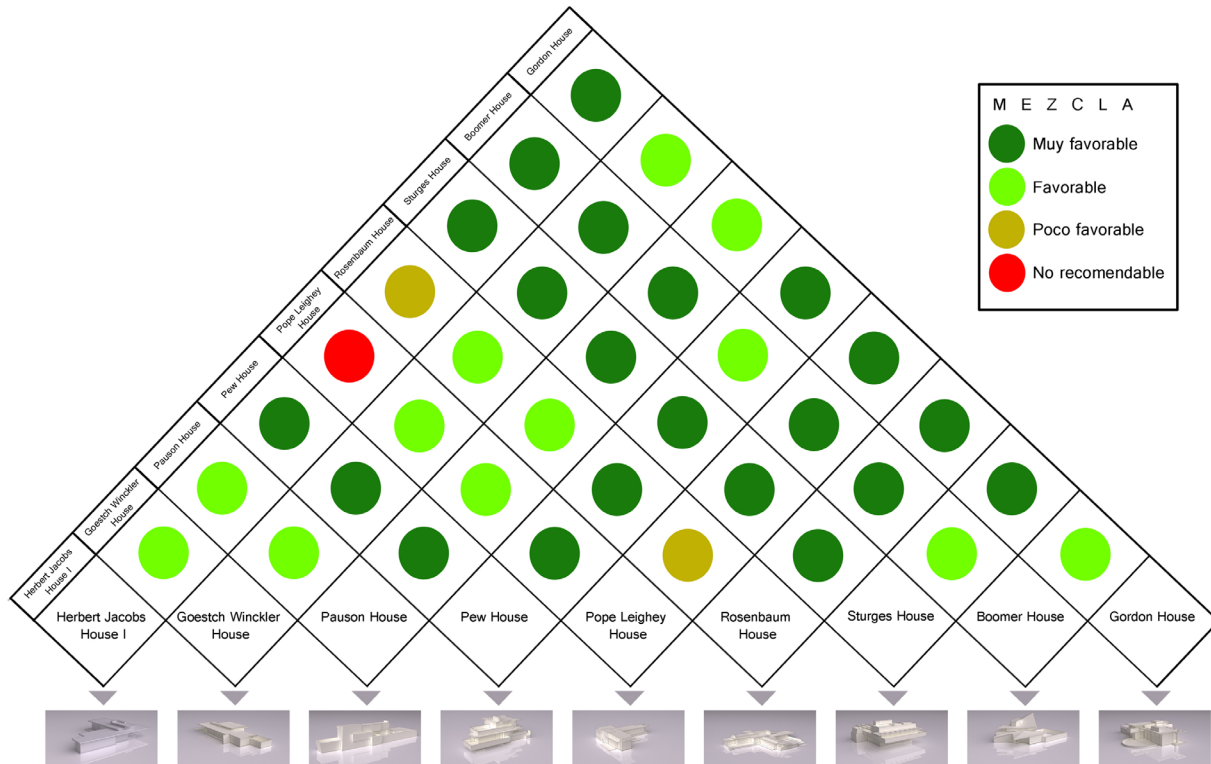


Fig 1. Cuadro combinatorio donde se analiza la conveniencia de la mezcla entre los modelos.

El cuadro explicativo mostraba un diagrama similar en su configuración con el cuadro de Punnett⁽³⁾ (el mismo que se utiliza para explicar el experimento con guisantes de Mendel), donde se analiza **la conveniencia de la mezcla entre los modelos**. Un primer análisis, concluyó que la selección de modelos de casas con una misma tipología espacial y planimétrica (Jacobs I, Pope Leighy y Rosenbaum) carecía de un interés morfológico espacial, debido a que la mezcla no ofrecía una evolución de estas características. Por otra parte, en el caso de los modelos con una volumetría concentrada, el interés venía dado en algunos casos por su diversidad formal y topológica (Pew y Sturges), lo cual permitía una gran variabilidad en los resultados entre los cruces con los otros modelos. De igual manera, la casa Boomer con su interesante geometría podía evolucionar con las otras tipologías y en menor medida, con las volumetrías concentradas. Otro caso particular ocurría con los modelos con tipologías con formas de “L”, “T”, “h” e “I” (Jacobs I, Goestch Winckler, Pauson, Pope Leighy, Rosenbaum y Gordon), donde las formas intermedias se centraban en las mismas tipologías, predominando aquella con mayor complejidad (número de alas) sobre la más simple (la lineal en “I”), penalizándolas mínimamente por su menor **grado de evolución**.

(3) El cuadro de Punnett es un diagrama diseñado por Reginald Punnett y es utilizado por los biólogos para determinar la probabilidad de que un producto tenga una característica hereditaria particular. El cuadro de Punnett permite observar cada combinación posible de un alelo materno con otro alelo paterno por cada gen estudiado.

6.7. Proyección de futuro.

En estos últimos veinte años la técnica del morphing ha ido evolucionando rápidamente. En la década pasada la técnica llegó a un nivel de madurez. Esta madurez viene dada por el menor número de artículos referidos al tema y porque aquellos artículos publicados hacían referencia a temas de morphing con una alta especialización.

Como se pudo apreciar en la revisión de las técnicas, hay una serie de implementaciones sobre morphing. Sin embargo, existen muchas técnicas que no se utilizan en el ámbito arquitectónico y que sólo ven la luz aquellas que están desarrolladas para los programas de animación y diseño. Hay una serie de técnicas que valdría la pena ser implementadas para arquitectura, en especial aquellas técnicas que puedan ser incorporadas a programas de Modelado de información de la construcción (*BIM, Building Information Modeling*) o programas de Análisis de diseño sustentable. En el caso de los BIM, la utilización del morphing podría estar relacionada con los modelos de masa para definir la geometría del edificio y las relaciones espaciales en las primeras etapas del proceso de diseño; así también, en la definición y evolución de los elementos estructurales o constructivos utilizados para la definición de los modelos. De igual forma, en los programas de Análisis de diseño sustentable podría ser una herramienta muy potente en los primeros desarrollos de la volumetría del proyecto en conjunto con el análisis y cálculo del asoleamiento, radiación, acústica, vientos, superficies y cubicaciones, entre otros.

A modo general, aparte de los alcances pedagógicos con la técnica del morphing, su uso en las primeras etapas del diseño arquitectónico puede ser potenciado con la **reinserción** de diferentes variables formales en cualquier momento cronológico del proceso arquitectónico. Esta reinserción podría ocurrir **al comienzo del historial** de las instrucciones informáticas del diseño, permitiendo reconfigurar todo el historial del proceso de diseño. En otro sentido, sería interesante que un programa de morphing permitiera **parametrizar el área o el volumen** de la forma de transición, de tal manera que cuando se realizara la transformación la forma transitoria mantuviera los metros cúbicos o metros cuadrados de la misma.

7. BIBLIOGRAFÍA.

7.1. Libros y revistas.

Aicher, Otl, and Wilhelm Vossenkühl. 2001. *Analógico y digital*. Barcelona: Gustavo Gili.

Anderson, Scott. 1993. *Morphing magic*. Carmel, Ind.: H.W. Sams.

Arnheim, Rudolf. 2001. *La forma visual de la arquitectura*. Barcelona: Editorial G. Gili, GG Reprints.

Binet, René, Robert Proctor, and Olaf Breidbach. 2007. *René Binet: From nature to form*. Munich; London: Prestel.

Bloomenthal, Jules, Chandrajit Bajaj, Jim Blinn, Marie-Paule Cani-Gascuel, Alyn Rockwood, Brian Wyvill, and Geoff Wyvill. 1997. *Introduction to implicit surfaces*. San Francisco, C.A.: Morgan Kaufmann Publishers.

Bohigas, Oriol. 1969. *Contra una arquitectura adjetivada*. Barcelona: Editorial Seix Barral.

Bonell Costa, Carmen. 1997. *Las leyes de la pintura*. Barcelona: Eds. UPC.

Borie, Alain, Pierre Micheloni, and Pierre Pinon. 2008. *Forma y deformación de los objetos arquitectónicos y urbanos*. Estudios universitarios de arquitectura. Vol. 15. Barcelona: Reverté.

Bousquet, Michele, and Glenn Melenhorst. 1995. *Morphing & Animation: Release 3 and 4*. New York: Delmar Publishers.

- Braun, Marta, and Etienne-Jules Marey . 1992. *Picturing time : The work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)*. Chicago: University of Chicago Press.
- Burns, Patrick J. 1994. *CD-morph! : Explore gryphon software's amazing special effects and animation software*. Reading [etc.]: Addison-Wesley.
- Byrnes, Robert. 2008. *Metamorphs: Transforming mathematical surprises*. Tarquin Publications.
- Chan, C-S. 1992. Exploring individual style in design. *Environment and Planning B: Planning and Design* 19 (5): 503-23.
- Collins, Peter. 1981. *Los ideales de la arquitectura moderna: Su evolución (1750-1950)*. 5ª ed. Barcelona: G. Gili.
- Colloque Étienne-Jules Marey et le film scientifique., Dominique de Font-Réaulx, Thierry Lefebvre, Laurent Mannoni, and Musée d'Orsay (Paris). 2006. *Ej marey : Actes du colloque du centenaire*. Paris: Arcadia Ed.
- Corona Martínez, Alfonso. 1998. *Ensayo sobre el proyecto*. Argentina: Kliczkowski Publisher.
- Dagognet, François. 1992. *Etienne-Jules Marey: A passion for the trace*. New York; Cambridge, Mass: Zone Books ; Distributed by the MIT Press.
- De Luca, Francesco, and Antonino Saggio. 2002. *Behind the scenes: Avant-garde techniques of contemporary design*. Basel etc.: Birkhäuser.
- Díaz-Urmeneta Muñoz, Juan Bosco, José Lebrero Stals, Luisa López Moreno, Ignacio Gómez de Llaño, Juan Serrano, and Centro Andaluz de Arte Contemporáneo (Seville). 2005. *Modelos, estructuras, formas: España 1957-79*. Seville: Centro Andaluz de Arte Contemporáneo.
- Doczi, György. 1999. *El poder de los límites: Proporciones armónicas en la naturaleza, el arte y la arquitectura*. Buenos Aires: Troquel.
- Dollens, Dennis. 2002. *De lo digital a lo analógico*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Durand, Jean-Nicolas-Louis. 1800. *Recueil et parallèle des édifices de tout genre, anciens et modernes*. Paris: S.I.
- Durand, Jean-Nicolas-Louis, and Rafael Moneo. 1981. *Compendio de lecciones de arquitectura: Parte gráfica de los cursos de arquitectura*. Madrid: Pronaos.
- Edgerton, Harold Eugene, Estelle Jussim, and Gus Kayafas. 1987. *Stopping time: The photographs of Harold Edgerton*. New York: H.N. Abrams.
- Eisenman, Peter. 1982. *House X*. New York: Rizzoli.
- Eisenman, Peter, Stan Allen, and Cynthia Davidson. 2006. *Tras el rastro de Eisenman: Peter Eisenman, obra completa*. Madrid: Akal.
- Eisenman, Peter, and Robert E. Somol. 1999. *Diagram diaries*. London: Thames & Hudson.
- Emmerich, David Georges.. 1982. *Exercice de géométrie constructive : Travaux d'étudiants, 1981-1982*. Paris: École d'architecture de Paris La Villette.
- Emmerich, David Georges. *Course in constructive geometry; morphology*. in Dept. of Architecture, University of Washington [database online]. Seattle, 1970.
- Engel, Klaus, Markus Hadwiger, Joe M. Kniss, Christof Rezk-Salama, and Daniel Weiskopf. 2006. *Real-time volume graphics*. Wellesley, Mass.: A K Peters.
- Foreing Office Architects, Albert Ferré, and Michael Kubo. 2003. *Filogénesis: Las especies de FOA foreign office architects*. Barcelona: Actar.
- Foster, Norman, Deyan Sudjic, and David Jenkins. 2000. *On foster...foster on*, ed. David Jenkins. Munich: Prestel.

- Gabriel, J. François. 1997. *Beyond the cube: The architecture of space frames and polyhedra*. New York etc.: Wiley & Sons.
- Gans, Deborah, and Zehra Kuz. 2003. *The organic approach to architecture*. Chichester (England); Hoboken, NJ: Wiley-Academy; John Wiley and Sons.
- Gantes, C. J. 2001. *Deployable structures: Analysis and design*. High performance structures and materials. Vol. 2. Southampton; Boston: Wit.
- Gaudí, Antoni, and Daniel Giralt-Miracle. 2008. *Antonio Gaudí la recerca de la forma*. [S.l.]: Triangle Postals.
- Ghyka, Matila C. 1983. *Estética de las proporciones en la naturaleza y en las artes*. 3ª ed. Barcelona: Poseidón.
- Giedion, Siegfried. 1978. *La mecanización toma el mando*. Tecnología y sociedad. Barcelona: Gustavo Gili.
- Gilbreth, Frank Bunker,. 2007. *Historic motion study films of Frank Gilbreth*. [s.l.]: Quality Information Publisher.
- Goethe, Johann Wolfgang Von, Henri Bortoft , Jeremy Naydler, Carlos Fortea, and Esther de Arpe. 2002. *Goethe y la ciencia*. Madrid: Siruela.
- Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, and Luiz Velho. 1999. *Warping and morphing of graphical objects*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Gruber, Stefan, and Institut für Kunst und Architektur (Austria). 2006. *Rethinking geometries*. Vienne: Institute for Art and Architecture.
- Guerrero, Pedro E. 1994. *Picturing Wright: An album from Frank Lloyd Wright's photographer*. San Francisco, Calif.: Pomegranate Artbooks.
- Hauer, Erwin. 2004. *Erwin Hauer continua: Architectural screens and walls*. New York: Princeton Architectural.
- Hearn, Donald, and M. Pauline Baker. 2006. *Gráficos por computadora con OpenGL*. 3ª ed. Madrid, etc.: Pearson Educación.
- Hearn, Fil. 2006. *Ideas que han configurado edificios*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Hertel, Heinrich. 1966. *Structure-form-movement*. New York: Reinhold.
- Hildebrand, Grant. 1991. *The Wright space: Pattern and meaning in Frank Lloyd Wright's houses*. Seattle: University of Washington Press.
- Hildebrandt, Stefan, and Anthony Tromba. 1985. *Mathematics and optimal form*. New York: Scientific American Library: Distributed by W.H. Freeman.
- Hitchcock, Henry-Russell. 1978. *Frank Lloyd Wright: Obras 1887-1941*. Barcelona: G. Gili.
- Holden, Alan, and Doug Kendall. 1991. *Shapes, space and symmetry*. New York NY: Dover.
- Hwang, Irene. 2006. *Natures*. Barcelona: Actar.
- Jansen, Theo. 2007. *Theo Jansen: The great pretender*. Rotterdam: 010 Uitgeverij.
- Jormakka, Kari, Oliver Schürer, and Dörte Kuhlmann. 2008. *Design methods*. Basel; Boston: Birkhäuser.
- Kahn, Louis I. 1984. *Forma y diseño*. Buenos Aires: Nueva Visión.
- Kappraff, Jay. 1990. *Connections: The geometric bridge between art and science*. New York: McGraw-Hill Pub. Co.
- Kepes, Gyorgy. 1966. *The man-made object*. Vision and value series. London: Studio Vista.

- Kepes, Gyorgy. 1966. *Module, proportion, symmetry, rhythm*. Vision + value series. New York, NY: George Braziller.
- Kepes, Gyorgy. 1966. *Sign, image and symbol*. Vision + value series. London: Studio Vista.
- Kepes, Gyorgy. 1965. *The nature and art of motion*. Vision + value series. New York, NY: George Braziller.
- Kepes, Gyorgy. 1965. *Education of vision*. Vision + value series. New York: George Braziller.
- Kepes, Gyorgy. 1965. *Structure in art and in science*. Vision and value series. London: Studio Vista.
- Knauer, Roland. 2007. *Transformation: Basic principles and methodology of design*. Basel; London: Birkhäuser ; Springer [distributor].
- Knight, Terry Weissman. 1994. *Transformation in design: A formal approach to stylistic change and innovation in the visual arts*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kolarevic, Branko. 2003. *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. New York; London: Spon Press.
- Kolarevic, Branko, and Ali Malkawi. 2005. *Performative architecture: Beyond instrumentality*. New York etc.: Spon Press.
- Lalvani, H., David Georges Emmerich, S. Sadao, and K. Snelson. 1996. *Origins of tensegrity: Views of emmerich, fuller and snelson and responses*. *International Journal of Space Structures* 11 (1/2): 27-56.
- Laseau, Paul, and James Tice. 1992. *Frank Lloyd Wright: Between principle and form*. New York: John Wiley & Sons.
- Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1998. *Three-dimensional metamorphosis: A survey*. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 373-89.
- Le Ricolais, Robert, and University of Pennsylvania. Meyerson Hall. 1996. *Visions and paradox : An exhibition of the work of robert le ricolais*. Philadelphia, Pa.: University of Pennsylvania.
- Lista, Giovanni. 2001. *Futurism & photography*. London: Merrell.
- Lynn, Greg. 1999. *Animate form*. New York: Princeton Architectural Press.
- Lynn, Greg. 1998. *Folds, bodies & blobs : Collected essays*. [Bruxelles]: La Lettre volée.
- March, Lionel, and Philip Steadman. 1974. *The geometry of environment: An introduction to spatial organization in design*. Cambridge: M.I.T. Press.
- Marcolli, Attilio. 1978. *Teoría del campo: Curso de educación visual*. Madrid: Xarait.
- Massad, Fredy, Alicia Guerrero Yeste, and Col·legi d'Arquitectes de Catalunya. 2002. *A+a :Arquitecturanimació = architecturanimation : Assaig = essay, flip-book, cd-rom*. Barcelona: Coac.
- Migayrou, Frédéric, and Marie-Ange Brayer. 2001. *Archilab: Radical experiments in global architecture*. London: Thames & Hudson.
- Mitchell, William J., and Malcolm McCullough. 1996. *Digital design media*. New York, NY [u.a.]: Van Nostrand Reinhold.
- Montes Serrano, Carlos. 1992. *Representación y análisis formal: Lecciones de análisis de formas*. Valladolid: Universidad. Secretariado de Publicaciones.
- Muñoz Cosme, Alfonso. 2008. *El proyecto de arquitectura: Concepto, proceso y representación*. Barcelona: Reverté.
- Navarro de Zuñiga, Javier. 2008. *Forma y representación: Un análisis geométrico*. Madrid: Akal.
- Norberg-Schulz, Christian. 2001. *Intenciones en arquitectura*. GG reprints. 3ª ed. Barcelona: G. Gili.
- Panafieu, Jean-Baptiste de, and Patrick Gries. 2007. *Evolución*. Barcelona: Blume.

- Parodi, Aníbal, and Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. 2005. Puertas adentro: Interioridad y espacio doméstico en el s. XX. Barcelona: Edicions UPC.
- Pearce, Peter. 1978. Structure in nature is a strategy for design. Cambridge Mass.; London: The MIT Press.
- Pearce, Peter, and Susan Pearce. 1978. Polyhedra primer. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Pearce, Peter, and Susan Pearce. 1980. Experiments in form: A foundation course in three-dimensional design. New York, etc.: Van Nostrand Reinhold Co.
- Pfeiffer, Bruce Brooks, and Yukio Futagawa. 2002. Frank Lloyd Wright Usonian houses. Tokyo, Japan: A.D.A Edita.
- Pfeiffer, Bruce Brooks, and Yukio Futagawa. 2002. Frank Lloyd Wright: Prairie houses. Tokyo: A.D.A. Edita.
- Piqué, Josep, Anna Omedes Regàs, Mercedes Parraga, Elvira Ferragut, Museu de Ciències Naturals de Barcelona, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, and Museu de Zoologia. 2004. Els altres arquitectes = Los otros arquitectos = the others architects. Barcelona: Ajuntament de Barcelona, Institut de Cultura.
- Pizza, Antonio, and Marisa García. 2002. Arte y arquitectura futuristas (1914-1948). Colección de arquitectura. Vol. 42. Murcia: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos. Caja Murcia.
- Pottmann, Helmut, Daril Bentley, Michael Hofer, and Andreas Asperl. 2007. Architectural geometry. Exton, PA: Bentley Institute Press.
- Puebla, Joan. 2002. Neovanguardias y representación arquitectónica. Barcelona: Edicions UPC.
- Rahim, Ali. 2006. Catalytic formations :Architecture and digital design. London: Taylor & Francis.
- Rappolt, Mark. 2008. Greg lynn FORM. New York: Rizzoli.
- Schattschneider, Doris, M. C. Escher, and Wallace Walker. 1990. M.C. escher calidociclos. Berlin: Benedikt Taschen.
- Schumacher, Patrik. 2004. Digital Hadid: Landscapes in motion. Basel etc.: Birkhäuser.
- Sergeant, John. 1976. Frank Lloyd Wright's Usonian houses: The case for organic architecture. New York: Watson-Guption Publications.
- Shaw, Susannah. 2003. Stop motion: Craft skills for model animation. Boston: Elsevier Focal Press.
- Sobchack, Vivian. 2000. META morphing: Visual transformation and the culture of quick-change. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Steadman, Philip. 1982. Arquitectura y naturaleza: Las analogías biológicas en el diseño. Madrid: H. Blume.
- Stiny, George. 2006. Shape : Talking about seeing and doing. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Storrer, William Allin. 1993. The Frank Lloyd Wright companion. Chicago; London: The University of Chicago Press.
- Suárez, Osbel, and Eugenio Fontaneda. 2007. Lo[s] cinético[s] : [exposición, madrid, museo nacional centro de arte reina sofía] del 27 de marzo al 20 de agosto de 2007. Madrid: Museo nacional Centro de arte Reina Sofía.
- Sullivan, Louis H., y Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia. 1985. Un sistema de ornamento arquitectónico acorde con una filosofía de los poderes del hombre. Murcia: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos etc.
- Szalapaj, Peter. 2005. Contemporary architecture and the digital design process. Amsterdam; Boston: Architectural Press.
- Szalapaj, Peter. 2001. CAD principles for architectural design: Analytical approaches to computational representation of architectural form. Oxford; Boston: Architectural Press.
- Terzidis, Kostas. 2009. Algorithms for visual design using the processing language. Indianapolis, IN: Wiley Pub.

- Terzidis, Kostas. 2007. *Algorithmic architecture*. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, Architectural Press.
- Terzidis, Kostas. 2003. *Expressive form: A conceptual approach to computational design*. London [u.a.]: Spon Press.
- Thom, René. 1987. *Estabilidad estructural y morfogénesis: Ensayo de una teoría general de los modelos. Límites de la ciencia*. Barcelona: Gedisa.
- Thompson, D'Arcy Wentworth, John Tyler Bonner, and Ana María Rubio Díez. 2003. *Sobre el crecimiento y la forma*. Madrid: Cambridge University Press.
- Tzonis, Alexander, and Liane Lefaivre. 1995. *Movement, structure, and the work of Santiago Calatrava*. Basel; Boston: Birkhäuser.
- Vronay, David, and Shuo Wang. 2004. *Designing a compelling user interface for morphing*. Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems. Vienna, Austria: ACM.
- Wagensberg, Jorge. 2004. *La rebelión de las formas, o, cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta*. Barcelona: Tusquets.
- Whittier, William B., Kinematic analysis of tensegrity structures. in University Libraries, Virginia Polytechnic Institute and State University [database online]. Blacksburg, Va., 2002.
- Williams, Robert. 1979. *The geometrical foundation of natural structure: A source book of design*. New York: Dover.
- Wolberg, George. 1990. *Digital image warping*. Wiley-IEEE Computer Society Press.
- Wolf, K. L., and Dorothea Kuhn . 1959. *Forma y simetría : Una sistemática de los cuerpos simétricos*. Buenos Aires: EUDEBA.
- Wright, Frank Lloyd. 1971. *The natural house*. London: Pitman Publishing.
- Wright, Frank Lloyd, and José Avendaño. 1998. *Autobiografía :1867-[1943]*. Madrid: El Croquis.
- Wright, Frank Lloyd, and Robert McCarter. 2005. *On and by Frank Lloyd Wright: A primer of architectural principles*. London: Phaidon.
- Zevi, Bruno. 1988. *Frank Lloyd Wright. Obras y proyectos*. 3ª ed. Barcelona: Gustavo Gili.
- Zuk, William, and Roger H. Clark. 1970. *Kinetic architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

7.2. Páginas web.

Institute for Data Analysis and Visualization. "Evolutionary Morphing", [En línea], consulta 13 de Octubre de 2011. Disponible en la Web: <<http://www.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph>>

Lee, Daniel. Manimals. "MANIMALS" 1993, [en línea]. New York, Tokio, Taipei: Daniel Lee, represented by O.K., 2006.[Consulta: 13 Octubre 2011]. Disponible en la Web: <<http://www.daniellee.com/Manimal.htm>>

Lee, Daniel. Manimals. "ORIGIN"1999-2003, [en línea]. New York, Tokio, Taipei: Daniel Lee, represented by O.K., 2007.[Consulta: 13 Octubre 2011]. Disponible en la Web: <<http://www.daniellee.com/Origin.htm>>

Zhao, Yonghong, Hong-Yang Ong, Tiow-Seng Tan and Yongguan Xiao. Interactive Control of Component-based Morphing. National University of Singapore [En línea]. Last updated March 2004. Consulta 13 de Octubre de 2011. Disponible en la Web: <<http://www.comp.nus.edu.sg/~tants/morphing.html>>

7.3. Artículos.

- Alexa, Marc. 2002. Recent advances in mesh morphing. *Computer Graphics Forum* 21 (2): 173-97.
- Alexa, Marc. 2001. Mesh morphing: STAR - state of the art report.
- Alexa, Marc. 2000. Merging polyhedral shapes with scattered features. *The Visual Computer* 16 (1): 26-37.
- Arad, Nur, and Daniel Reissfeld. 1995. Image warping using few anchor points and radial functions. *Computers Graphics Forum* 14 (1) (January): 35-46.
- Attene, Marco, Silvia Biasotti, and Michela Spagnuolo. 2001. Re-meshing techniques for topological analysis. *Shape Modeling and Applications, International Conference on*.
- Aubert, Fabrice, and Dominique Bechmann. 1997. Animation by deformation of space-time objects. *Computer Graphics Forum (Eurographics '97 Proceedings)* 16 (3).
- Bao, Yunfan, Xiaohu Guo, and Hong Qin. 2005. Physically based morphing of point-sampled surfaces: Animating geometrical models. *Comput.Animat.Virtual Worlds* 16 (3-4) (July): 509-18.
- Barr, Alan H. 1984. Global and local deformations of solid primitives. *SIGGRAPH84* 18 (3) (jul): 21-30.
- Barrett, William, Eric Mortensen, and David Taylor. 1994. An image space algorithm for morphological contour interpolation. Paper presented at *In Proc. Graphics Interface*, .
- Bechmann, Dominique. 1994. Space deformation models survey. *Computers & Graphics* 18 (4): 571-86.
- Beier, Thaddeus, and Shawn Neely. 1992. Feature-based image metamorphosis. Paper presented at *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, .
- Bethel, Wes, and Sam Uselton. 1989. Shape distortion in computer-assisted keyframe animation. Paper presented at *Computer Graphics International*, .
- Bichsel, Martin. 1996. Automatic interpolation and recognition of face images by morphing. Paper presented at *Proc. Second Intl. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, Killington, VT*, .
- Blanding, Robert L., George M. Turkiyyah, Duane W. Storti, and Mark A. Ganter. 2000. Skeleton-based three-dimensional geometric morphing. *Comput.Geom.Theory Appl.* 15 (1-3) (February): 129-48.
- Blanz, Volker, and Thomas Vetter. 1999. A morphable model for the synthesis of 3D faces. Paper presented at *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .
- Blinn, James F. 1982. A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Trans.Graph.* 1 (3) (July): 235-56.
- Blinn, James F. 1978. Simulation of wrinkled surfaces. *Computer Graphics* 12 (3): 286-92.
- Blinn, James F., and M. E. Newell. 1976. Texture and reflection in computer generated images. *Comm. ACM* 19 (10) (July): 362-7.
- Bloomenthal, Jules, Chandrajit Bajaj, Jim Blinn, Marie-Paule Cani-Gascuel, Alyn Rockwood, Brian Wyvill, and Geoff Wyvill. 1997. *Introduction to implicit surfaces*. San Francisco, C.A.: Morgan Kaufmann Publishers.
- Bloomenthal, Jules, and Ken Shoemake. 1991. Convolution surfaces. Paper presented at *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .
- Borrel, Paul, and Dominique Bechmann. 1991. Deformation of n-dimensional objects. *Proceedings of the First ACM Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications* 1 (4): 427-53.

- Borshukov, George, Dan Pisoni, Oystein Larsen, J. P. Lewis, and Christina Tempelaar-Lietz. 2005. Universal capture - image-based facial animation for the matrix reloaded. Paper presented at ACM SIGGRAPH 2005 Courses, Los Angeles, California.
- Breen, David E., and Ross T. Whitaker. 2001. A level-set approach for the metamorphosis of solid models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 7 : 173-92.
- Bregler, Christoph, Michele Covell, and Malcom Slaney. 1997. Video rewrite: Driving visual speech with audio. Paper presented at *Proceedings of Computer Graphics (SIGGRAPH'97)*, .
- Carmel, Eyal, and Daniel Cohen-Or. 1997. Warp-guided object-space morphing. *The Visual Computer* 13 : 465-78.
- Catmull, Edwin. 1974. A subdivision algorithm for the display of curves and surface. ph. D. thesis. University of Utah.
- Catmull, Edwin, and Alvy Ray Smith. 1980. 3D-transformations of images in scanline order. *Computer Graphics (SIGGRAPH '80 Proceedings)* 14 (3) (July): 279-85.
- Chadwick, J. E., D. R. Haumann, and Richard E. Parent. 1989. Layered construction for deformable animated characters. *Proceedings SIGGRAPH '89* 23 (July): 243-52.
- Chan, C-S. 1992. Exploring individual style in design. *Environment and Planning B: Planning and Design* 19 (5): 503-23.
- Chang, Yu-Kuang, and Alyn P. Rockwood. 1994. A generalized de casteljau approach to 3D free-form deformation. Paper presented at *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .
- Chen, Min, Mark W. Jones, and Peter Townsend. 1996. Volume distortion and morphing using disk fields. *Computers and Graphics*(20): 567-75.
- Chen, Shenchang E., and Richard E. Parent. 1989. Shape averaging and its applications to industrial design. *IEEE Computer Graphics and Applications* 9 (1) (January): 47-54.
- Chen, Shenchang E., and Lance Williams. 1993. View interpolation for image synthesis. *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)* 27 (aug): 279-88.
- Cmolik, Ladislav, and Miroslav Uller. 2003. Point cloud morphing. Faculty of Electrical Engineering - Czech Technical University: 1-8.
- Cohen-Or, Daniel, David Levin, and Amira Solomovici. 1998. Three-dimensional distance field metamorphosis. *ACM Transactions on Graphics* 17 (No. 2): 116-41.
- Coquillart, Sabine. 1990. Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling. *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)* 24 (August): 187-96.
- Coquillart, Sabine, and Pierre Jancene. 1991. Animated free-form deformation: An interactive animated technique. *Proceedings SIGGRAPH '91* 25 (July): 23-6.
- Darsa, Lucia. 1994. Graphical objects metamorphosis. master's thesis. Rio de Janeiro: Computer Science Department. PUC-Rio.
- DeCarlo, Douglas, and Jean Gallier. 1996. Topological evolution of surfaces. Paper presented at *Proceedings of GI'96*, .
- Decaudin, Philippe, and Andre Gagalowicz. 1994. Fusion of 3D shapes. Paper presented at *Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, .
- Delingette, Hervé, Y. Watanabe, and Y. Suenaga. 1993. Simplex based animation. Paper presented at *In Models and Techniques in Computer Animation (Computer Animation '93)*, .
- Ezzat, Tony, and Tomaso Poggio. 1999. Visual speech synthesis by morphing visemes. Paper presented at *In MIT A.I Memo No. 1658*, .
- Ezzat, Tony, and Tomaso Poggio. 1997. Videorealistic talking faces: A morphing approach. Paper presented at *In AVSP'97 workshop*,

Rhodos, .

Fang, Xiang, Hujun Bao, Pheng Ann Heng, TienTsin Wong, and Qunsheng Peng. 2001. Continuous field based free-form surface modeling and morphing. *Computers & Graphics* 25 (2) (4): 235-43.

Galín, Eric, and Samir Akkouche. 1996. Blob metamorphosis based on minkowski sums. *Computer Graphics Forum (Eurographics '96 Proceedings)* 15 (3): 143-53.

Galín, Eric, Antoine Leclercq, and Samir Akkouche. 2000. Morphing the BlobTree. *Computer Graphics Forum* 19 (4): 257-70.

Galín, Eric, Antoine Leclercq, and Samir Akkouche. 1999. Blob-tree metamorphosis. *Proceedings of Implicit Surfaces* 9-16 .

Gibson, Sarah F., and Brian Mirttich. 1997. A survey of deformable models in computer graphics.

Goldstein, Eli, and Craig Gotsman. 1995. Polygon morphing using a multiresolution representation. *Proceedings of Graphics Interface: 247-54.*

Gomes, Jonas, Bruno Costa, Lucia Darsa, and Luiz Velho. 1995. Deformaccio e metamorfose de objetos gráficos. Instituto de Matemática Pura e Aplicada.

Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, and Luiz Velho. 1998. A system's architecture for warping and morphing of graphical objects. *Graphics, Patterns and Images, SIBGRAPI Conference on 0* : 192.

Gregory, Arthur, Andrei State, Ming C. Lin, Dinesh Manocha, and Mark A. Livingston. 1999. Interactive surface decomposition for polyhedral morphing. *The Visual Computer.* 15 (9): 453.

Gregory, Arthur, Andrei State, Ming C. Lin, Dinesh Manocha, and Mark A. Livingston. 1998. Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra. Paper presented at *Proceedings of the Computer Animation,* .

Hahmann, S., G. P. Bonneau, B. Caramiaux, and M. Cornillac. 2007. Multiresolution morphing for planar curves. *Computing* 79 (2) (April): 197-209.

He, Taosong, Sidney Wang, and Arie Kaufman. 1994. Wavelet-based volume morphing. Paper presented at *Proceedings of Visualization '94,* .

Heckbert, Paul S. 1989. *Fundamentals of texture mapping and image warping.* University of California, Berkeley, .

Heckbert, Paul S. 1986. Survey of texture mapping. *IEEE Computer Graphics and Applications* 6 (11) (November): 56-67.

Hong, Tong M., N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. 1988. A general algorithm for 3D-shape interpolation in a facet-based representation. *Proc Graphics Interface:* 229-35.

Hoppe, Hugues. 1996. Progressive meshes. Paper presented at *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques,* .

Hsu, William M., John F. Hughes, and Henry Kaufman. 1992. Direct manipulation on free-form deformation. *Proceedings SIGGRAPH '92* 26 : 177-84.

Hughes, John F. 1992. Scheduled fourier volume morphing. *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)* 26 (2): 43-6.

Jin, Xiaogang, Shengjun Liu, Charlie C. L. Wang, Jieqing Feng, and Hanqiu Sun. 2005. Blob-based liquid morphing: Natural phenomena and special effects. *Comput.Animat.Virtual Worlds* 16 (3-4) (July): 391-403.

Ju, Tao, and Ron Goldman. 2003. Morphing rational B-spline curves and surfaces using mass distributions. *EUROGRAPHICS.*

Kajiya, James T., and Timothy L. Kay. 1989. Rendering fur with three dimensional textures. Paper presented at *Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques,* .

- Kanai, Takashi, Hiromasa Suzuki, and Fumihiko Kimura. 2000. Metamorphosis of arbitrary triangular meshes. *IEEE Computer Graphics and Applications* 20 : 62-75.
- Kanai, Takashi, Hiromasa Suzuki, and Fumihiko Kimura. 1998. Three-dimensional geometric metamorphosis based on harmonic maps. *The Visual Computer* 14 (4): 166-76.
- Kaneko, Kosuke, and Yoshihiro Okada. 2008. Skeleton based 3D model morphing using barycentric map. Paper presented at *Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2008. CGIV '08. Fifth International Conference on*, .
- Kass, Michael, Andrew Witkin, and Demetri Terzopoulos. 1988. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*: 321-31.
- Kaufman, Arie. 1991. *Volume visualization (tutorial)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press.
- Kaul, Anil, and Jarek Rossignac. 1991. Solid-interpolating deformations: Construction and animation of PIPs. Paper presented at *Proceedings of Eurographics '91*, .
- Kent, James R., Wayne E. Carlson, and Richard E. Parent. 1992. Shape transformation for polyhedral objects. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 26 (2): 47-54.
- Kent, James R., Richard E. Parent, and Wayne E. Carlson. 1991. Establishing correspondence by topological merging: A new approach to 3-D shape transformation. Paper presented at *Proceedings of Graphics Interface '91*,pp, .
- Kil, Yong Joo, Pietro Renzulli, Oliver Kreylos, Bernd Hamann, Guisepe Monno, and Oliver G. Staadt. 2006. 3D warp brush modeling. *Computers & Graphics* 30 (4) (8): 610-8.
- Kil, Yong Joo, Pietro Renzulli, Oliver Kreylos, Bernd Hamann, Guisepe Monno, and Oliver G. Staadt. 2005. 3D warp brush: Interactive free-form modeling on the responsive workbench. Paper presented at *In Proceedings of IEEE Virtual Reality 2005*, .
- Kirschner, Ursula. 2008. Study of digital morphing tools during the design process - application of freeware software and of tools in commercial products as well as their integration in AutoCAD. *SIGraDi 2008 - [proceedings of the 12th iberoamerican congress of digital graphics] la habana - cuba 1-5 december 2008*.
- Koile, Kimberle. 2006. Formalizing abstract characteristics of style. *Artif.Intell.Eng.Des.Anal.Manuf.* 20 (3) (June): 267-85.
- Koile, Kimberle. 2001. *The architect's collaborator: Toward intelligent tools for conceptual design*.
- Koning, H., and J. Eizenberg. 1981. The language of the prairie: Frank lloyd wright's prairie houses. *Environment and Planning B* 8 (3): 295-323.
- Kopp, Manfred, and Werner Purgathofer. 1992. *Multiresolution image morphing*. Viena, austria: Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics, .
- Lasseter, John. 1987. Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. *Proceedings of the 14th annual conference on computer graphics and interactive techniques.ACM*.
- Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1998. Three-dimensional metamorphosis: A survey. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 373-89.
- Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1997. Metamorphosis of cylinder-like objects. *Journal of Visualization and Computer Animation*: 131-46.
- Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1995. Feature-based shape transformation for polyhedral objectsHAL - CCSD.
- Lee, Aaron W. F., David Dobkin, Wim Sweldens, and Peter Schröder. 1999. Multiresolution mesh morphing. Paper presented at *Proc. SIGGRAPH 99*, .
- Lee, Aaron W. F., Wim Sweldens, Peter Schröder, Lawrence Cowsar, and David Dobkin. 1998. MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces. Paper presented at *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .

- Lee, Seung-Yong, Kyung-Yong Chwa, James Hahn, and Sung Yong Shin. 1994. Image morphing using deformable surfaces. Paper presented at In Proc. of Computer Animation, .
- Lee, Seung-Yong, Kyung-Yong Chwa, Sung Yong Shin, and George Wolberg. 1995. Image metamorphosis using snakes and free-form deformations. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), .
- Lee, Won-Sook, and Nadia Magnenat-Thalmann. 2001. Virtual body morphing. Paper presented at Computer Animation, 2001. The Fourteenth Conference on Computer Animation. Proceedings, .
- Lee, Yuencheng, Demetri Terzopoulos, and Keith Waters. 1995. Realistic modeling for facial animation. Paper presented at Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .
- Lerios, Apostolos, Chase D. Garfinkle, and Marc Levoy. 1995. Feature based volume metamorphosis. Proceedings SIGGRAPH '95 29 (August): 449-56.
- Mardia, Kanti V., and Chris Glasbey. 1998. A review of image-warping methods. *Journal of Applied Statistics* 25 (2) (April): 155-71.
- Markarian, H., Ralph Bernstein, D. G. Ferneyhough, L. E. Gregg, and F. S. Sharp. 1971. Implementation of digital techniques for correcting high resolution images. *Proc.Amer.Inst.Aeronautics and Astronautics, 8th Annual Meeting.*: 285-304.
- Nishimura, H., A. Hirai, T. Kawai, T. Kawata, I. Shirakawa, and K. Omura. 1985. Object modeling by distribution function and a method of image generation. *Journal of Papers Given at the Electronics Communication Conference '85 J68 (D(4))*.
- Ohbuchi, Ryutarou, Yoshiyuki Kokojima, and Shigeo Takahashi. 2001. Blending shapes by using subdivision surfaces. *Computers & Graphics* 25 (1) (2): 41-58.
- Parent, Richard E. 1992. Shape transformation by boundary representation interpolation: A recursive approach to establishing face correspondences. *The Journal of Visualization and Computer Animation* 3 (4): 219-39.
- Parent, Richard E. 1977. A system for sculpting 3D data. *Computer Graphics* 11 (2) (August): 138-47.
- Parus, Jindrich, and Ivana Kolingerová. 2004. Morphing of meshes with attributes. Paper presented at Proceedings of the 20th spring conference on Computer graphics, Budmerice, Slovakia.
- Parus, Jindrich, and Ivana Kolingerová.. 2003. Mesh morphing. (May): 298-302.
- Parus, Jindrich, Ivana Kolingerová, and Martina Málková. 2009. Multimorphing: A tool for shape synthesis and analysis. *Advances in Engineering Software* 40 (5) (5): 323-33.
- Payne, Bradley A., and Arthur W. Toga. 1992. Distance field manipulation of surface models. *Computer Graphics and Applications, IEEE* 12 (1): 65-71.
- Perlin, Ken, and Eric M. Hoffert. 1989. Hypertexture. Paper presented at Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .
- Pettit, Greg W., Harry H. Robertshaw, and Dan J. Inman. 2001. Morphing wings for unmanned aircraft. *Smart Materials Bulletin* 2001 (11) (11): 7-12.
- Rosenfeld, Azriel,. 1969. *Picture processing by computer*. New York: Academic Press.
- Rossignac, Jarek, and Anil Kaul. 1994. AGRELS and BIBs: Metamorphosis as a bézier curve in the space of polyhedra. Paper presented at In: Proc. Eurographics'94, .
- Ruprecht, Detlef, and Heinrich Muller. 1995. Image warping with scattered data interpolation. *IEEE Computer Graphics & Applications (march)*: 37-43.
- Ruprecht, Detlef, and Heinrich Muller. 1994. A framework for generalized scattered data interpolation. Presented at the Fifth Eurogra-

phics Workshop on Visualization in Scientific Computing, .

Sederberg, Thomas W., P. Gao, G. Wang, and H. Mu. 1993. 2D shape blending: An intrinsic solution to the vertex path problem. *Proceedings SIGGRAPH '93* 27 : 15-8.

Sederberg, Thomas W., and Eugene Greenwood. 1992. A physically based approach to 2-D shape blending. Paper presented at *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, .

Sederberg, Thomas W., and S. R. Parry. 1986. Free-form deformation of solid geometric models. *Proceedings SIGGRAPH '86* 20 : 151-60.

Seitz, Steven M., and Charles R. Dyer. 1996. View morphing. Paper presented at *Proceedings of SIGGRAPH '96 (New Orleans, LA, August 4--9, 1996)*, .

Shapira, Michal, and Ari Rappoport. 1995. Shape blending using the star skeleton representation. *IEEE Computer Graphics and Applications* 15 (March): 44-50.

Shapiro, Avner, and Ayellet Tal. 1998. Polyhedron realization for shape transformation. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 429-44.

Shlafman, Shymon, Ayellet Tal, and Sagi Katz. 2002. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. *Computer Graphics Forum*(21): 219-29.

Slaney, Malcom, M. Covell, and B. Lassiter. 1996. Automatic audio morphing. Paper presented at *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, .

Sorensen, Peter. 1992. Morphing magic. *Computer Graphics World* 15 (1) (January): 37-42.

Steketee, Scott N., and Norman I. Badler. 1985. Parametric keyframe interpolation incorporating kinetic adjustment and phrasing control. Paper presented at *Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .

Stollnitz, Eric J., Tony D. DeRose, and David H. Salesin. 1996. *Wavelets for computer graphics: Theory and applications*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Sun, Yue Man, Wenping Wang, and Francis Y. Chin. 1997. Interpolating polyhedral models using intrinsic shape parameters. *The Journal of Visualization and Computer Animation* 8 (2): 81-96.

Sutherland, Ivan Edward,. 1963. *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*. Lexington, Mass.: M.I.T. Lincoln Laboratory.

Takahashi, Shigeo, Yoshiyuki Kokojima, and Ryutarou Ohbuchi. 2001. Explicit control of topological transitions in morphing shapes of 3D meshes. Paper presented at *Proceedings of the ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PACIFIC GRAPHICS-01)*, IEEE Computer Society, .

Terzidis, Kostas. 1999. Experiments on morphing systems. *III congreso iberoamericano de grafico digital [SIGRADI conference proceedings] montevideo (uruguay) september 29th - october 1st 1999*, pp. 149-151.

Terzidis, Kostas. 1989. Transformational design. *New ideas and directions for the 1990's [ACADIA conference proceedings] gainsville (florida - USA) 27-29 october 1989*, pp. 87-101.

Terzidis, Kostas, and Ali Malkawi. 2002. Distorted eye. *SIGraDi 2002 - [proceedings of the 6th iberoamerican congress of digital graphics] caracas (venezuela) 27-29 november 2002*, pp. 261-263.

Terzopoulos, Demetri, Yuencheng Lee, M. Alex, and O. Vasilescu. 2004. Model-based and image-based methods for facial image synthesis, analysis and recognition. Published in the *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition* ed.

Terzopoulos, Demetri, John Platt, Alan H. Barr, and Kurt Fleischer. 1987. Elastically deformable models. Paper presented at *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, .

- Turk, Greg, and James F. O'Brien. 1999. Shape transformation using variational implicit surfaces. Paper presented at in Proc. SIGGRAPH, .
- Turk, Greg, and James F. O'Brien. 1998. Variational implicit surfaces. Georgia Institute of Technology, Tech Report GIT-GVU-99-15.
- Wells, Gary L., and Lisa E. Hasel. 2007. Facial composite production by eyewitnesses. *Current Directions in Psychological Science* 16 (February): 6,10(5).
- Wiley, David F., Nina Amenta, Dan A. Alcantara, Deboshmita Ghosh, Yong Joo Kil, Eric Delson, Will Harcourt-Smith, F. James Rohlf, Katherine St. John, and Bernd Hamann. 2005. Evolutionary morphing. Paper presented at Proceedings of IEEE Visualization 2005, Minneapolis, Minnesota.
- Wolberg, George. 1998. Image morphing: A survey. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 360-72.
- Wolberg, George. 1990. Digital image warping. Wiley-IEEE Computer Society Press.
- Wolberg, George. 1989. Skeleton-based image warping. *The Visual Computer* 5 (1/2) (March): 95-108.
- Wyvill, Brian. 1994. Building and animating implicit surface models. SIGGRAPH '93 Course Notes ed.
- Wyvill, Brian, Andrew Guy, and Eric Galin. 1999. Extending the CSG tree. warping, blending and boolean operations in an implicit surface modeling system. *Computer Graphics Forum* 18 (2): 149-58.
- Wyvill, Geoff, Craig McPheeters, and Brian Wyvill. 1986. Data structure for soft objects. *The Visual Computer* 2 (4) (August): 227-34.
- Xiao, Chunxia, Wenting Zheng, Qunsheng Peng, and A. R. Forrest. 2004. Robust morphing of point-sampled geometry. *Comput. Animat. Virtual Worlds* 15 (3-4) (July): 201-10.
- Xiao, Jiangjian, and Mubarak Shah. 2004. Tri-view morphing. *Computer Vision and Image Understanding* 96 (3) (12): 345-66.
- Xiaojun, Wang, Zhai Haitao, Xia Jie, and Cui Zhiming. 2009. GPU-based morphing terrain real-time shadow algorithm. Proceedings of the 2009 International Symposium on Web Information Systems and Applications: 198-201.
- Zach, Christopher. 2002. Integration of geomorphing into level of detail management for realtime rendering. Paper presented at Proc. 18th Spring Conf. Computer Graphics, .
- Zeltzer, David. 1985. Towards an integrated view of 3-D computer animation. Paper presented at Proceedings of Graphics Interface '85 on Computer-generated images: the state of the art, Montreal, Quebec, Canada.
- Zhao, Yonghong, Hong-Yang Ong, Tiow-Seng Tan, and Yongguan Xiao. 2003. Interactive control of component-based morphing. Paper presented at Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, San Diego, California.
- Zöckler, Malte, Detlev Stalling, and Hans-Christian Hege. 2000. Fast and intuitive generation of geometric shape transitions. *The Visual Computer* 16 (5): 241-53.
- Zonenschein, Ruben, Jonas Gomes, Luiz Velho, and Luiz Henrique de Figueiredo. 1997. Texturing implicit surfaces with particle systems. Paper presented at Visual Proceedings (Computer Graphics Annual Conference Series), .
- Zou, Xuan, Josef Kittler, and Jose Tena. 2008. A morphing system for effective human face recognition. IET Conference Publications 2008 (CP543): 215-20.

8. ÍNDICE.

A

Adquisición volumétrica 6, 123.
aguzado 70.
alas metamorfosis 134.
Alberto Durero 23.
 Durero 23.
algoritmo 47, 49, 53, 57, 59.
algoritmo de deformación 70, 75.
aliasing 48.
Alvy Ray Smith 47.
Análisis Planimétrico 6, 178.
anamorfosis 23.
animación 22, 28, 33, 37, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 53, 54, 58, 63, 64, 68, 69, 73, 89, 90, 98, 111, 113, 127, 129, 132.
aplastamiento 210.
Apple 22.
árbol 44, 54, 58.
árbol CSG 101, 107.
árbol-formal 58.
área privada 16, 142, 147.
área social 16, 142, 143, 144, 146, 147, 150.
arquitectura flexible 12.
atractor 103, 104.
automatismo 219, 220.

automatización 53.
Avid Technology 85.

B

Balcones 145.
Basamento 144.
Beier y Neely 49, 50.
bend 70.
BIM 227.
blending 50, 57, 58, 69, 78, 93, 101, 110, 125, 126.
blobby objects 93.
blobs 42, 54, 93, 94, 101, 107, 108, 109.
Blob-Tree 101.
bloques de Froebel 139, 244.
botella de Klein 187.
Bruno Zevi 148.
Building Information Modeling 227.

C

CAD 38.
cámara virtual 88, 89.

cambios significativos 170, 199, 200, 213.
 campos continuos 106.
 campos de influencia 81, 83, 102, 104, 220.
 campos distantes 104, 220.
 Característica de Euler 188.
 características correspondientes 49.
 características de los objetos gráficos 6, 217.
 carport 143, 144, 149, 244.
 Casa Boomer 149.
 Casa Darwin Martin 140.
 Casa Goestch Winckler 146, 244.
 Casa Gordon 144, 145, 149.
 Casa Herbert Jacobs I 146, 244.
 Casa Jacobs 137, 145, 146.
 casa Kaufmann 147.
 Casa Pauson 145, 147, 244.
 Casa Pew 147, 244.
 Casa Pope Leighy 145, 148, 244.
 Casa Rosenbaum 145, 148, 244.
 casas Pradera 136, 137, 138, 140, 244.
 Casa Sturges 149.
 centroide 179, 180.
 chimenea 137, 142, 146, 147, 148, 149, 150, 179, 213.
 Chimenea 144.
 cinta de Möbius 187.
 cirugía topológica 6, 170, 189, 190, 225.
 claristorios 137.
 clasificación de un repertorio 174, 175.
 claves 6, 32, 170, 175, 195, 196, 200, 204, 212, 213, 219.
 claves de animación 196.
 Cmolik y Uller 56.
 combinación de forma 78.
 componentes 42, 44, 50, 55, 56.
 composición 36, 138, 139, 140, 145, 146, 147.
 conectividad 44, 45, 49, 56, 180, 182, 185, 189, 243, 185.
 conectores 186.
 conjunto de nivel 94, 96, 102.
 contorno 25, 39, 56, 147, 185.
 contracción 66, 115.
 control de la interpolación 55.
 control de la transición 82.
 control de transición 195.
 control de transiciones 53.
 control de usuario 55, 219, 221, 243.
 convexidad 90, 209, 210.
 coordenadas cartesianas 142.
 Corrección geométrica 5, 73.
 correspondencia 5, 16, 23, 33, 42, 49, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 66, 68, 69, 72, 75, 76, 78, 79, 81, 84, 87, 91, 99, 100, 101, 103, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 127, 129, 130, 170, 172, 176, 177, 178, 179, 186, 190, 191, 200, 201, 213, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 246.
 correspondencia funcional 172, 176, 178, 213.
 correspondencias de vértices 49.
 crecimiento 21, 24, 25, 199.
 cross-dissolve 30, 36, 81, 83, 125, 129, 211.
 cuadrícula 137, 139, 146, 147.
 curvas de Bézier 52.

Curvas planas 63.

D

Daniel Lee 40, 235.
 Manimals 40, 235.
 Origin 40, 235.
 D'Arcy Thompson 24, 25, 141, 142, 243.
 On Growth and Form 24.
 Thompson 24, 25, 141.
 David Byrne 35.
 DeCarlo y Gallier 51, 52.
 Decaudin y Galagowicz 50.
 Definición de correspondencias 117.
 deformación 23, 25, 33, 35, 38, 47, 49, 50, 53, 54, 58, 63, 64, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 96, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 107, 118, 120, 124, 125, 126, 129, 181, 185, 187, 188, 189, 190, 199, 229.
 deformación de formas libres 85, 86.
 deformación de formas libres multi-nivel 85, 86.
 deformación de mallas 33, 82, 83, 84.
 desplazamiento 38.
 diagrama 25, 39, 176, 226, 244.
 diagrama de fuerzas 25.
 diagrama de un grafo 176.
 diagramas 27, 38.
 diseño arquitectónico formal 45.
 diseño híbrido 178.
 distorsión 45, 47, 49, 73, 74, 80, 81, 84, 88, 100, 104.
 Durand 169, 174, 175, 223, 230, 244.

E

Eadweard Muybridge 26, 27.
 Muybridge 26, 27, 28.
 Ed Catmull 47.
 efectos digitales 22.
 efectos especiales 5, 22, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 215, 216, 244.
 efectos fantásticos 22, 29.
 efectos visuales 54.
 eje medio 105, 108, 109, 220.
 ejes 51, 56, 138, 140.
 Elastic Reality 85.
 elemento característico 103, 104.
 elemento formal 181.
 elementos compositivos 182.
 Elementos de techumbre 144.
 elementos formales 16, 144, 182, 200.
 Elementos formales 6, 181.
 elementos lineales 181.
 elementos planimétricos 181.
 elementos volumétricos 181.
 Encaje 5, 75.
 enlaces 186.
 entornos digitales 49.
 Entradas y Salidas Lentas 212.
 escala 138, 140.
 escalado 38.
 escáner 3D 57.

Escáner 3D 32, 244.
 Escáner 3D Cyberware 32.
 espacio 22, 26, 27, 28, 30, 31, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 56, 57, 58, 59, 176, 180, 181, 183, 185, 189, 195, 199, 211, 212, 213, 217, 233.
 espacio de trabajo 144, 148, 150.
 espacios servidores 138.
 especie 178, 172, 145.
 especificación de características 53, 82, 83, 85, 86.
 esqueleto 94, 100, 101, 102, 105, 106, 107, 108, 111, 121, 122.
 esqueletos poliédricos 106, 108.
 establecimiento de correspondencia 219.
 estado del arte 5, 47, 53, 216.
 estereotipos 71.
 estiramiento 23, 68, 70, 186, 210.
 estrategia de transformación 170, 199, 200, 208.
 estrategia narrativa 200.
 estudio general 48, 52, 53.
 estudios antropométricos 133.
 estudios generales 48, 217, 244.
 Étienne-Jules Marey 24, 27.
 crono-fotografía 27.
 fusil fotográfico 27.
 Marey 24, 27, 28, 29.
 evolución 25, 27, 40, 43, 57, 221, 223, 225, 226, 227, 230, 244.
 evolución de la topología 190.
 evolución formal 9, 78, 205, 221.
 expansión 66, 103, 145.
 extensión 38, 42, 50, 145.
 extrapolación 45, 71.
 extrusión 38.

F

facetado 53, 208.
 Fallingwater 147.
 fases intermedias 195.
 FFD 70, 86.
 Fil Hearn , 138, 138.
 filtrado 48.
 flexión 70, 88.
 forma híbrida 45, 202.
 formalismo 223.
 forma promedio 9, 71, 78, 112.
 forma resultante 50, 186.
 formas claves 6, 170, 195, 196, 200, 204, 219.
 formas intermedias 51, 58, 190, 207, 211, 212.
 forma transitoria 223, 227.
 forma y función 176.
 form follows function 176.
 fórmula de Euler 188.
 Foster + Partners 43, 244.
 fotograma 30, 36, 49, 59, 196.
 fotogramas clave 69, 196, 212.
 fotogramas claves 195, 196, 212.
 fotogramas intermedios 69, 75, 79, 127, 196, 212, 216.
 fragmentación 39.
 Frank B. Gilbreth 30.

Frank Lloyd Wright

bloques de Froebel 139.
 Broadacre City 146.
 carport 144, 149.
 Casa Goestch Winckler 146.
 Casa Herbert Jacobs I 146.
 Casa Pauson 147.
 Casa Pew 147.
 Casa Pope Leighey 148.
 Casa Rosenbaum 148.
 casas de la Pradera 136, 137, 138, 140, 141.
 casas Pradera 136.
 hallway 137.
 Retículas Usonianas 138.
 sistema de franjas 140.
 Usonianas 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 146, 147.
 ventanas claristorio 140.
 window wall 137.
 Wright 135, 136, 137, 138, 140, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 176.
 Froebel 139.
 Froebeliano 136.
 funcionalismo arquitectónico 175.
 función de atributos 65, 96.
 función implícita 93, 94.
 fundamentos del mapeado de texturas 48.
 fundidos cruzados 125.

G

galería 137, 143, 144, 146, 147, 148.
 Galin et al. 54.
 género topológico 54, 189, 193, 218, 220.
 Geometría constructiva de sólidos 92.
 geomorphing 97, 120, 121, 242.
 Georges Méliès 29.
 Méliès 29.
 George Wolberg 48, 53.
 Gibson y Mirttich 52.
 Gomes et al. 15, 53, 207, 208, 245.
 grado de transición 170, 197, 204.
 gráfico 5, 6, 22, 55, 59, 173, 176, 181, 182, 192, 195, 197, 207.
 gráficos por ordenador 31, 52, 54.
 grafo , 176, 176.
 Gregory et al. 52.
 Griffon y Vincent 24.
 grupo de transformación 211.
 guión gráfico 200.

H

Hans Holbein 23, 24.
 hardware 59.
 Harold Edgerton 31.
 flash electrónico 31.
 hermanos Lumière 29.
 hibridación 41, 42, 45, 46, 172, 173, 202, 172.
 híbrido 172, 178, 197, 205.

híbridos ficticios 172, 173.
 Hildebrand 136, 231.
 hipertextura 94.
 homeomorfa 91.
 homeomorfismo 186, 188.
 homeomorfismos 188.
 Housing 41, 245.
 hypertexture 94, 123.

I

IBM 22.
 imagen bidimensional 47.
 Imágenes Generadas por ordenador 31.
 CGI 31, 33.
 Image Warping 47.
 Industrial Light & Magic 32, 33.
 ILM 32, 33.
 El Abismo 32, 33.
 La Máscara 32.
 Morf 33.
 Star Trek IV: The Voyage Home 32.
 Terminator 2 32, 33, 34.
 Willow 32, 33.
 in-between 78.
 intermediación 9, 78.
 interpolación 51, 55, 178, 190, 195, 204, 211, 212.
 interpolación formal 9, 78.
 interpolación geométrica 190.
 interpolación lineal 125.
 interpolación matemática 178.
 invariante topológica 188.
 invarianza 142.
 isometría 66.
 isomorfo 187.
 isosuperficies 54, 93, 94, 98, 109.
 isosurfaces 94.

J

Jean Nicolas Louis Durand 174, 175, 244.
 Durand 174.
 Leçons d'Architecture 174.
 Recueil et Parallèle des Edifices 174.
 jerarquías 138.
 Jim Blinn 47.
 Jonas Gomes et al. 53.

K

Kafka 21.
 Kent, Carlson y Parent 49, 50.
 keyframes 195.
 keyshapes 195.
 Kolatan y Mac Donald 41, 42.
 Housing 41.
 monstruos 42.
 ruido 42.
 suprema 42.

supremas 42.
 Koning & Eizenberg 136.
 Kostas Terzidis 15, 43, 44, 45, 216, 245.
 reformación 43.
 reformaciones 43, 44.
 Terzidis 43, 44, 45, 205.

L

laboratorio 144.
 la escala 175, 180.
 la forma sigue a la función 176.
 Laseau y Tice 136, 141.
 Lasseter 68, 207, 210, 239.
 la Tourette 44, 45.
 Lazarus y Verroust 50, 51, 53.
 Le Corbusier 44, 45, 245.
 Leonardo da Vinci 23.
 Lerios et al. 50, 51.
 linealidad 204, 211.
 Louis Kahn 138, 200, 245.
 LucasFilm 33.

M

malla auxiliar 83.
 malla de control 51.
 malla de control independiente 191.
 mallas 33, 49, 54, 55, 56, 58, 59, 193.
 mallas poligonales 55, 56.
 mallas poligonales cerradas 193.
 mallas triangulares 58, 59.
 mapa de color 96.
 mapa de píxeles 96.
 mapas de elevación 53.
 mapas de terreno 59.
 mapeado 47, 48, 55, 186, 193, 194, 204.
 mapeado de imagen 47.
 mapeado de spline 48.
 mapeado de textura 47, 48.
 mapeado de texturas 47, 48.
 Mapeado directo 65.
 mapeado directo e inverso 82.
 mapeado geométrico 48.
 Mapeado Inverso 65.
 mapeados armónicos 115.
 Marc Alexa 54, 55.
 Markarian 47.
 Martin Newell 47.
 masa 25, 30, 34, 38, 52, 180, 181, 210, 227.
 mass customization 41.
 matriz de píxeles 96.
 McCarter 136, 140, 141, 234.
 media 58, 71, 72, 97, 126, 137, 138, 146, 232, 245.
 mediana 71, 72.
 media ponderada 58.
 Meta Balls 93.
 metabolas 93, 107.
 metamorfosis 21, 48, 49, 53, 54, 56, 211.

metamorfosis tridimensional 48, 53.
 meta-objeto 42.
 Mezcla 125.
 Michael Graves 44, 45, 245.
 Michael Jackson 32, 34, 35, 245.
 Microsoft 22.
 minimización de energía 82, 85.
 moda 71, 72.
 modelado de la forma 6, 123.
 modelador 50, 182.
 modelado y renderizado basado en imagen 74.
 modelo 6, 28, 32, 33, 39, 41, 43, 54, 56, 57, 58, 146, 173, 178, 181, 182, 183, 192, 222.
 modelo de representación 178, 182.
 modelo intermedio 54.
 modelos de representación 178.
 Modelos de superficies 123.
 modelos poliédricos 49, 52.
 modulación 140, 147.
 Monotonicidad 210.
 Montaje 125.
 morfismos 36.
 morfología 24, 207.
 Morfología 6, 179, 179.
 morphing 22, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 135, 173, 178, 182, 187, 190, 193, 195, 196, 197, 199, 205, 207, 209, 235.
 morphing 2D 5, 32, 33, 36, 49.
 morphing 2D 5, 15, 32, 33, 36, 46, 49, 75, 78, 79, 82, 215, 216, 245.
 morphing 3D 33, 34, 44, 48, 50.
 Morphing Anidado 38.
 morphing arquitectónico 6, 9, 14, 169, 196, 197, 199, 207, 223.
 morphing basados en fronteras 5, 111.
 morphing basados en volumen 5, 97.
 morphing con imágenes 22, 53.
 morphing con mallas 54, 55.
 Morphing de dos dimensiones 5, 80.
 morphing de estriación 39.
 Morphing de interferencia 39.
 Morphing de Superposición 38.
 morphing de vista 87, 88.
 Morphing Mapeado 38.
 morphing por zonas 82, 83, 84.
 Morphing Torsionado 38.
 muestreo 57, 75, 95.
 multimorphing 58, 59, 245.
 multi-nivel 56.
 multi-niveles 55.
 multi-resolución 82, 87, 116, 222.
 muros exentos 144.

N

NASA 31.
 Nicolas Oresme 22, 23.
 nivel de especificación 182.
 nivel de rigidez 210.
 nubes de puntos 56, 57, 245.

núcleo de servicios 143.
 número de puntos 223.

O

objeto híbrido 45, 46, 178, 193, 197, 197.
 objetos arquitectónicos 178, 181.
 objetos blandos 54, 93, 100, 101.
 objetos globulares 93.
 objetos gráficos 6, 13, 15, 17, 18, 53, 61, 63, 65, 67, 125, 127, 170, 207, 209, 211, 215, 217, 238.
 objetos intermedios 50, 57.
 objetos poliédricos 49, 51, 52.
 objetos volumétricos
 blobs 42, 54.
 BlobTree 54.
 objetos blandos 54.
 superficies implícitas 54.
 obra arquitectónica 182, 222.
 octree 95, 245.
 ondícula 99.
 operaciones de cirugía topológica 190.
 operación topológica 51.
 operadores booleanos 54.
 Optimización 6, 207.
 Ovidio 21.

P

Pacific Data Images 32, 49.
 PDI 32, 34, 35, 49.
 Batman Returns 32.
 Black or White 34, 35.
 Chrysler Plymouth Voyager 32.
 Exxon 32, 35.
 Michael Jackson 32, 34, 35.
 She is mad 35.
 paramétrico 37, 57.
 Parametrización 118.
 parametrizar 227.
 parches 57.
 paredes maestras 144, 145.
 pared ventana 137.
 Parus et al. 58, 59.
 pasillo 137, 143, 144, 148, 149.
 Pathé 29.
 Paul Heckbert 48.
 Peldaños 145.
 personalización masiva 41.
 Peter Eisenman 38, 39, 40.
 Eisenman 38, 39, 40.
 Pfeiffer y Futagawa 136.
 Philip Steadman 174, 176, 223.
 pilares adosados 144, 145.
 pilares exentos 145.
 pilar exento 144.
 pinceles de deformación tridimensional 73.
 pivote 143.
 pixel 59.
 pixel base 80.

planta de arquitectura 138.
 planta lineal 143.
 poliedro 185, 186, 188.
 poliedros 53, 54, 188.
 poliedro simple 186, 188.
 polígono cerrado simple 189.
 polígonos 58, 185, 188.
 popping 121.
 porcentaje de mezcla 204.
 PowerAnimator 33.
 preservación de características 207, 208.
 principios clásicos 138, 246.
 principios funcionales 179.
 procedimiento 6, 216, 219, 225.
 procesamiento de imágenes 47.
 procesamiento gráfico 59.
 proceso de correspondencia 54.
 proceso formal 38.
 programa 12, 15, 16, 33, 36, 37, 41, 46, 53, 57, 58, 170, 173, 175, 176, 182, 192, 195, 212, 223, 224, 225, 227.
 Programas de morphing 5, 36.
 promedio lineal 126.
 promedio ponderado 49, 126.
 proporción 23, 138.
 proyección ortogonal 58.
 puntos de anclaje 104.

R

rasgos 23, 32, 34, 37, 38, 49, 50, 54, 180, 202, 204, 208.
 rasgos característicos 49, 50, 204.
 re-combinación 42.
 reconocimiento facial 131.
 red de control 52.
 redes de control 52.
 Redes Irregulares Trianguladas 97.
 reformaciones 43, 44, 216, 245.
 reformations 43.
 Rejillas Regulares Cuadradas 97.
 rellanos 145.
 renderizado 59.
 Representación Basada en Imagen 48, 246.
 representación de la forma 53.
 representación de vóxeles 95.
 representaciones de fronteras 53.
 restricciones 50.
 retículas 138, 139, 141.
 rigidez 209, 210.
 Rosenfeld 47.
 rotación 38, 48.

S

Scanner láser 123.
 Scanner Volumétricos 123.
 Segundo de Chomón 29.
 La licuefacción de los cuerpos duros 29.
 shape averaging 9, 78, 112.
 shape blending 9, 69, 78, 110, 241.

shape evolution 9, 78.
 shape interpolation 9, 78, 111, 238.
 Shapiro y Tal 53.
 SIGGRAPH 32, 47, 48, 49, 50, 55, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 207, 210.
 Silicon Graphics 33, 34.
 simetrías 138.
 simulación 178, 179, 182, 183, 246, 182.
 simulación gráfica 178.
 sistema de franjas 140, 244.
 sistema de representación de sólidos 183.
 Slow In and Slow Out 212.
 smoothness 208.
 snakes 86, 96, 240.
 soft objects 93, 100.
 software 34, 36, 37, 38, 40, 42, 192.
 sombreados 59.
 soporte de la imagen 64.
 spline 48, 212.
 squash and stretch 210.
 stop-motion 129.
 Storrer 16, 136, 143, 233.
 storyboard 200.
 stretch 70, 210.
 suavizado 208.
 superficies cerradas 185, 189, 193.
 superficies implícitas 54, 92, 93, 94, 97, 98, 101, 109.
 superficies no orientables 187.
 superficie tridimensional 47.
 survey 48, 52, 53.
 survey article 48.
 Sutherland 47.

T

taper 70.
 técnicas de mapeado de imagen 47.
 técnicas de multi-resolución 82, 87.
 teledetección 47, 246.
 Terminator 2 32, 33, 34, 244.
 Terrazas 145.
 Terzidis 15, 43, 44, 45, 205, 216, 233, 234, 241, 245.
 textura 47, 48.
 The Natural House 138.
 tipología 41, 175, 224, 225, 226.
 Tom Brigham 33.
 topología 32, 41, 45, 49, 51, 179, 182, 185, 186, 187, 190, 192, 197, 209.
 torsión 38, 70, 101, 186, 246.
 trama de distribución 139.
 transformación 3D 51, 57.
 transformaciones cartesianas 25, 142, 246.
 transformaciones geométricas 31, 47, 210.
 transformación espacial 65, 75, 83.
 Transformaciones planimétricas 6, 140.
 transformaciones simples 5, 66.
 transformación lineal programada, 204.
 transformación paulatina 190, 192, 209.
 transformación topológica 186.

transición fluida 22.
trayectoria 30, 31, 54.
trayectorias 27, 28, 52, 55.
tweening 78.
twist 70.

U

uniones 105, 129, 192.
UN Studio 40.
Ursula Kirschner 45.
Usonianas 1, 6, 9, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 136, 137, 138, 139,
140, 141, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 149, 169, 179, 200, 202,
206, 213, 225, 244.

V

variación 38, 42, 141.
variaciones-formales 42.
variación-formal 42.
Victor Fleming 30.
 Dr. Jekyll and Mr. Hyde 30.
Viollet-le-Duc 138.
Visión General 5, 47.
Vivian Sobchack 15.
Volumen programático 144.
voxel 91, 95, 97, 99, 100, 102.

W

warping 38, 47, 48, 50, 53, 58, 63, 64, 74, 75, 80, 81, 82, 93,
99, 124, 125, 126, 129, 130.
wavelet 87, 99.
William Henry Fox Talbot 26.
window wall 137, 244.
work space 144.

X

Xiao et al. 57.
Xiaojun et al. 59.

Z

Zhao et al. 55, 56.

