

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Arquitectura

La génesis de lo técnico
Simulación, Optimización y fabricación del cascarón reticular geodésico de flexión activa

Tesis que para obtener el título de arquitecto presenta:
Erik Rafael Molina Arellano

Sinodales:

Dr. en Arq. Ronan Bolaños Linares
Mtra en Urbanismo Claudia Gabriela Ortíz Chao
Arq. ECL. Marcos Javier Ontiveros Hernández

Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2021





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

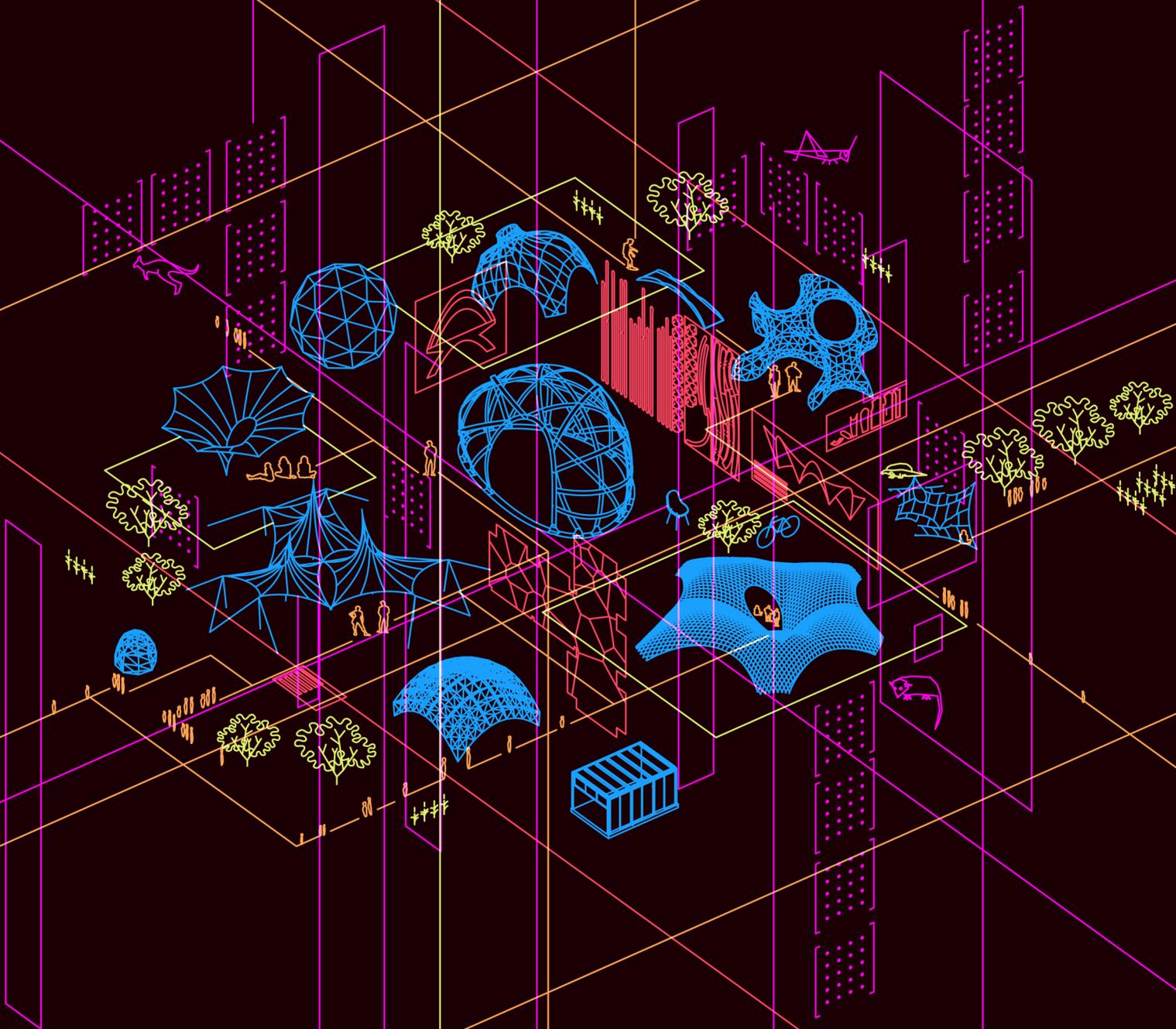
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

LA GÉNESIS DE LO TÉCNICO

Simulación, optimización y fabricación del cascarón reticular geodésico de flexión activa



Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México

Erik Rafael Molina Arellano

*A mis padres,
a mi abuela,
y a mis amigos.*

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a la red de amistades, familia y compañerxs que me apoyan y me quieren, con quienes me construyo.

Aprecio mucho el apoyo de mis asesorxs Ronan, Clau y Marcos, y su confianza en mi elección de tema a pesar de la reticencia de la academia hacia investigaciones como esta.

Quisiera agradecer particularmente a algunas personas por distintos motivos: a Lore, por ser mi amiga y acompañarme desde el inicio de la carrera a la fecha; a Yoli, por interesarse en mi tema, recomendarme literatura y darme ideas desde la arqueología y la antropología; a Jazo, por cultivar mi interés por el diseño industrial, alentar mi curiosidad y búsqueda creativa, por acompañarme en la primera etapa de esta investigación, y también por tomar las fotografías de la crisálida; a Iraís, Víctor Montserrat y Martha por su tiempo y trabajo para ayudarme con el prototipo de la crisálida en la expo; a Martha por ser mi amiga desde que nos conocimos en el laboratorio de estructuras y por compartir búsquedas intelectuales y creativas además de aprendizajes relacionados con las estructuras ligeras, diseño paramétrico, confección, y también por invitarme a participar en proyectos verdaderamente interesantes; agradezco enormemente a Migue, con quien compartí interminables horas de trabajo, investigación y conversaciones (tan caóticas como estimulantes), que me ayudó a profundizar y me ha inspirado constantemente a expandir los límites de lo posible en lo computacional y la fabricación digital, además de apoyarme con varios de mis proyectos, ese espacio de experimentación y creación que hemos compartido es invaluable; a Shwetabh Jo, que me inspiró desde su trabajo de investigación y experimentación incansable, que me enseñó a imprimir en 3D, y que me inspiró por su inigualable perseverancia; también a Alp Yilmaz, que me invitó de colado a mi primer taller de optimización con algoritmos genéticos en el ILEK; a Marce que confió en mí en múltiples ocasiones y me impulsó en mi desarrollo profesional y académico para la participación en ACADIA y mi práctica docente en la facultad, además de

que me escuchó y aconsejó en varias ocasiones; a Mau, que desde que fue mi profesor me hizo cuestionar mi actitud competitiva, y me demostró en la práctica la potencialidad de la colaboración horizontal, además de ejercer una pedagogía basada en la empatía, que influyó enormemente en mi persona y práctica docente; a Equihua por compartirnos su cuestionamiento disruptivo de las jerarquías y los dogmas en la academia y el gremio, y por generar un espacio-comunidad de aprendizaje donde se gestaron ideas sobre las inteligencias colectivas y pedagogías alternativas que influyeron fuertemente a esta investigación; a Wortmann por las interesantísimas explicaciones sobre optimización, y demostrar en su actitud cómo un enorme conocimiento puede estar asociado a una gran humildad; a Stephan Engelsmann, que me guió en mis primeras investigaciones y experimentos sobre cascarones reticulares funiculares; a Tadi, que fue un referente para mí de pensamiento crítico en la arquitectura, que desafió intelectual y personalmente mis prejuicios y supuestos, que además me recomendó mucha de la literatura en filosofía de la tecnología aquí citada, y que me inspiró con su extraordinaria tesis en biopolítica; a Enrique Pineda por introducirme al mundo de la Teoría Social, el Marxismo y las Autonomías; a Oliver, por adentrarme en el mundo de la Teoría Crítica; a Toño, que se tomó el tiempo de explicarme detalladamente conceptos sobre los modelos numéricos, la dimensionalidad, modelos de elemento finito, de volumen finito, y simulaciones, y por su amistad cuando trabajamos en los laboratorios de la Facultad y revisar algunos capítulos de esta investigación; a Héctor por todas las conversaciones sobre complejidad que nos llevaron al borde de la crisis existencial, el trabajo juntos y la amistad; a Dan, por el trabajo juntos en las actividades de diseño computacional en la facultad y en la FES, y por su energía y entusiasmo en la construcción juntos de muchos otros proyectos de aprendizaje colectivo; a Enrique H. por toda la iniciativa, entusiasmo y compromiso que al imprimir en sus proyectos de enseñanza y divulgación me ayudó a darle un nuevo aliento a mi práctica técnica-teórica, y por todas las actividades en las que hemos participado juntos y a las que me ha invitado que me han ayudado a encontrar un sitio renovado en el mundo del diseño computacional.

Quiero agradecer también a todos los espacios-comunidades y proyectos

colectivos que me han transformado y con los que me he construido en los últimos años: a la comunidad del chapulín, donde compartimos conocimientos sobre grasshopper y diseño paramétrico; a la cueva y al círculo de lectura (Dan, Caro, Theo, Emi, Lore, Yoli, Robin, Carlo y Jad) donde logramos construir un espacio de generación de ideas, que fue muy influyente para la profundización de mi pensamiento crítico; al comité estudiantil de geometría que me invitó a formar parte de muchas actividades y con quienes descubrí una nueva comunidad interesada por la socialización del conocimiento técnico; y a mis amigos de COMUNAL, que le dieron un giro a mi vida, me transformaron desde los cuestionamientos radicales y la participación en movimientos sociales, y donde encontré una comunidad dedicada a la construcción de un mundo otro.

Quiero agradecer especialmente a mis padres por su amor, y porque se esforzaron mucho por que creciera en un ambiente estimulante y seguro, y a mi abuela que siempre se ha preocupado por mi desarrollo en lo creativo y lo sensible.

Agradezco infinitamente a Jadiel Galicia, que me acompañó en el proceso de exploración teórica-crítica de esta investigación, con quien tuve una larga serie de conversaciones, que me influyó teóricamente desde la economía contrahegemónica, su investigación en externalidades, y su conocimiento sobre movimientos sociales. Me alentó y motivó constantemente y además se tomó el tiempo de leer y revisar los capítulos de esta Tesis, gracias a su amistad, acompañamiento y apoyo, pude terminar este trabajo de investigación.

Por último quiero agradecer a Jácome, por mostrarme el camino al mundo de las estructuras ligeras y el diseño computacional, que fue mi mentor la mayor parte de mi formación en la facultad, y me habló por primera vez del trabajo del ILEK, de Frei Otto, y del diseño paramétrico. Me permitió participar en sus clases como adjunto donde aprendí muchísimo tanto de estructuras como de pedagogía. Él es para mi el más sólido referente de congruencia, solidaridad y crítica en la práctica docente: siempre crítico a las figuras de autoridad y siempre dispuesto a escuchar, aconsejar y compartir su conocimiento.

Resumen

En este trabajo de investigación se abre y expone el proceso creativo de un objeto técnico: en torno a él se desarrolla una reflexión sobre la intersección de la tecnología y el diseño y sus diferentes dimensiones: desde una exploración detallada del conocimiento técnico contenido en el proceso creativo, hasta una reflexión de su dimensión filosófica y sociopolítica. Las relaciones que se trazan entre los grupos teóricos de lo técnico y lo filosófico y desde ahí explicar el fenómeno de la génesis de lo técnico.

Se toma como caso de estudio un sistema constructivo-estructural aquí nombrado Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa (CRGFA), que se caracteriza por tener una geometría basada en una superficie de doble curvatura formada por barras geodésicas cuya geometría constructiva es lograda mediante la deformación elástica de elementos rectos.

El primer y último capítulo reflexionan filosofía y ciencias sociales. Los tres capítulos centrales se enfocan en los aspectos técnicos del sistema propuesto; simulación, donde se explica la simulación como centro de la racionalidad lógica y cuantitativa en las disciplinas técnicas y se realiza una descripción matemático-computacional de la simulación del sistema mecánico en el caso de estudio; optimización, donde se discute sobre la eficiencia como factor configuradores del objeto técnico, y se hace un recorrido por diferentes métodos de optimización en arquitectura, (determinísticos, metaheurísticos y modelos sustitutos) además de una evaluación comparativa utilizando un ejemplo de CRGFA como caso de estudio, también se presenta la optimización multi-objetivo mediante el conjunto óptimo de pareto como herramienta para abrir el proceso de optimización y exponer su dimensión cualitativa y subjetiva; y fabricación, donde se hace una descripción analítica del caso de estudio y posteriormente una descripción de su proceso de edificación.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. INTRODUCCIÓN p.16

- 1.1. Estructura del texto
- 1.2. Metodología
- 1.3. Marco teórico
 - 1.3.1. Filosofía de la Tecnología
 - 1.3.1.1. Crítica al pensamiento positivista
 - 1.3.1.2. Tecnología y cultura
 - 1.3.1.3. Construcción social de la tecnología y el conocimiento
 - 1.3.1.4. Tecnosociedad
 - 1.3.1.5. Tecnología y política
 - 1.3.2. Estructuras ligeras y diseño computacional
 - 1.3.2.1. Cascarón reticular
 - 1.3.2.2. Geodesia
 - 1.3.2.3. Flexión activa
 - 1.3.2.4. Ensamblaje auto-guiado
- 1.4. La génesis de lo técnico (conclusiones de la introducción y el marco teórico)

2. SIMULACIÓN p.64

- 2.1. Modelo y simulación
- 2.2. Modelo matemático
 - 2.2.1. Teoría elástica clásica
 - 2.2.2. Resorte Longitudinal para esfuerzo normal: Ley de Hooke
 - 2.2.3. Resorte Radial para flexión
- 2.3. Modelo físico analógico
- 2.4. Modelo numérico
- 2.5. Simulación del CRGFA
 - 2.5.1. Programas
 - 2.5.2. Descripción del proceso de simulación
 - 2.5.2.1. Modelo geométrica (discretización paramétrica)
 - 2.5.2.2. Representación mecánica
 - 2.5.2.2.1. Deformación longitudinal por fuerza axial
 - 2.5.2.2.2. Deformación rotacional por momento flexionante
 - 2.5.2.2.3. Descripción de simulación computacional
 - 2.5.2.3. Representación de resultados
- 2.6. Caso de estudio: Crisálida
- 2.7. Conclusiones de simulación



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

4. FABRICACIÓN p.106

4.1. Anatomía del cascarón

4.1.1. Superficie

4.1.2. Borde apoyado

4.1.3. Borde no apoyado

4.1.4. Barra

4.1.5. Nodo

4.1.6. Apoyo

4.1.7. Entramado

4.1.8. Piel

4.2. Detalles constructivos

4.2. Barras

4.3. Borde no apoyado

4.4. Borde apoyado

4.5. Fabricación en taller

4.6. Ensamblaje en sitio

4.7. Conclusiones de fabricación

3. OPTIMIZACIÓN p.84

3.1. Introducción

3.2. Métodos de optimización

3.2.1. Definición

3.2.2. Optimización de caja negra

3.2.3. Algoritmos de optimización

3.2.3.1. Búsqueda directa

3.2.3.2. Métodos metaheurísticos

3.2.3.2.1. Templado simulado (SA)

3.2.3.2.2. Algoritmos genéticos (GAs)

3.2.3.2.3. Enjambre de partículas (PSO)

3.2.3.3. Modelos sustitutos (RBFOpt)

3.2.3.5. Optimización multi-objetivo y frente de Pareto

3.2.5. Herramientas de optimización para el diseño arquitectónico

3.3. Caso de estudio: Cubierta para "Hostal en Playa del Carmen"

3.3.1. Preprocesamiento

3.3.2. Problema con una función objetivo

3.3.2.1. Planteamiento

3.3.2.2. Resolución

3.3.2.3. Resultados y evaluación comparativa

3.3.2.4. Discusión

3.3.3. Problema multiobjetivo

3.3.3.1. Planteamiento

3.3.3.2. Resolución

3.3.3.3. Discusión

3.3.4. Conclusiones de optimización

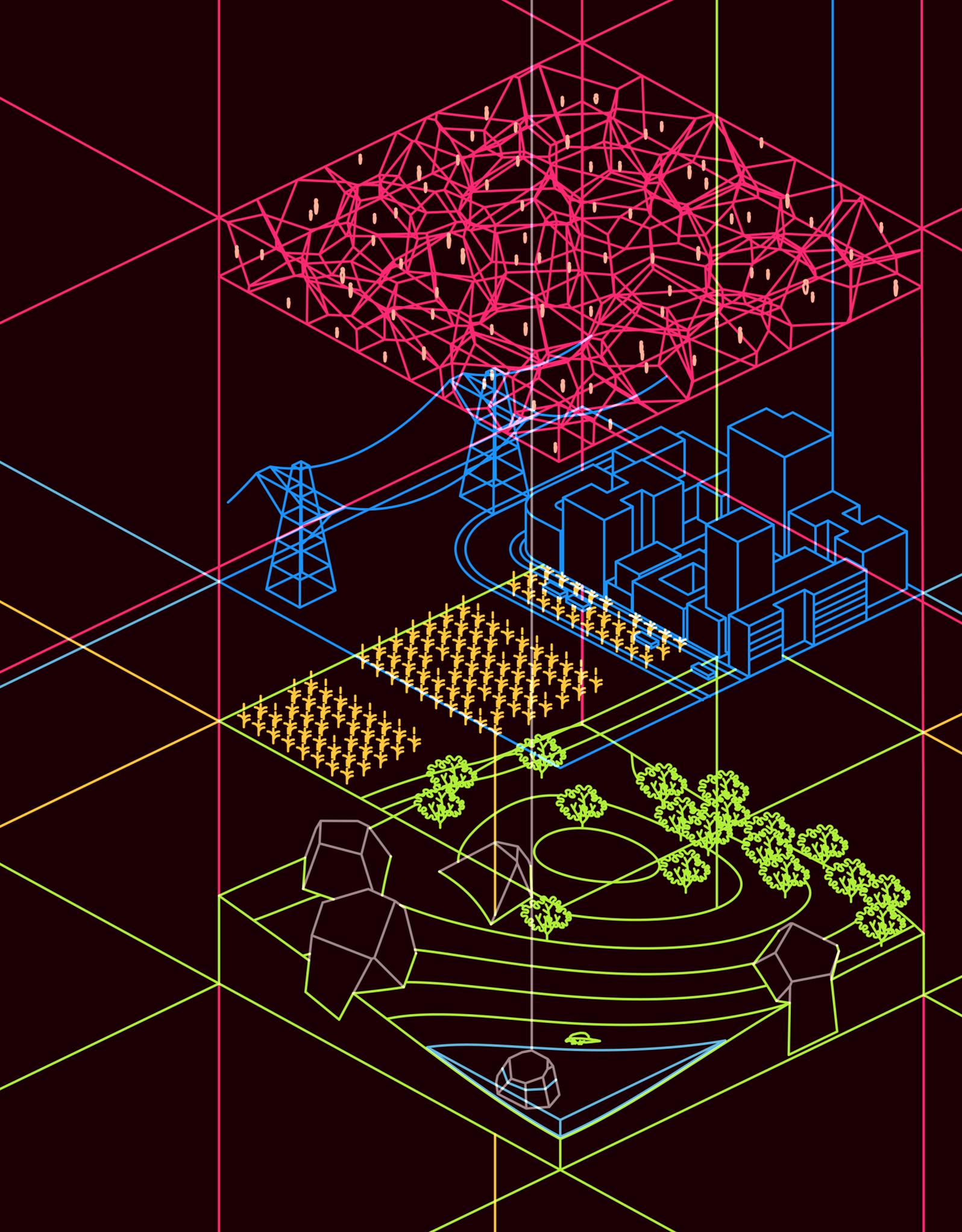
5. CONCLUSIONES p.126

5.1. La génesis de lo técnico

5.2. Subvertir las tecnologías

6. Referencias

p.132





1.INTRODUCCIÓN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

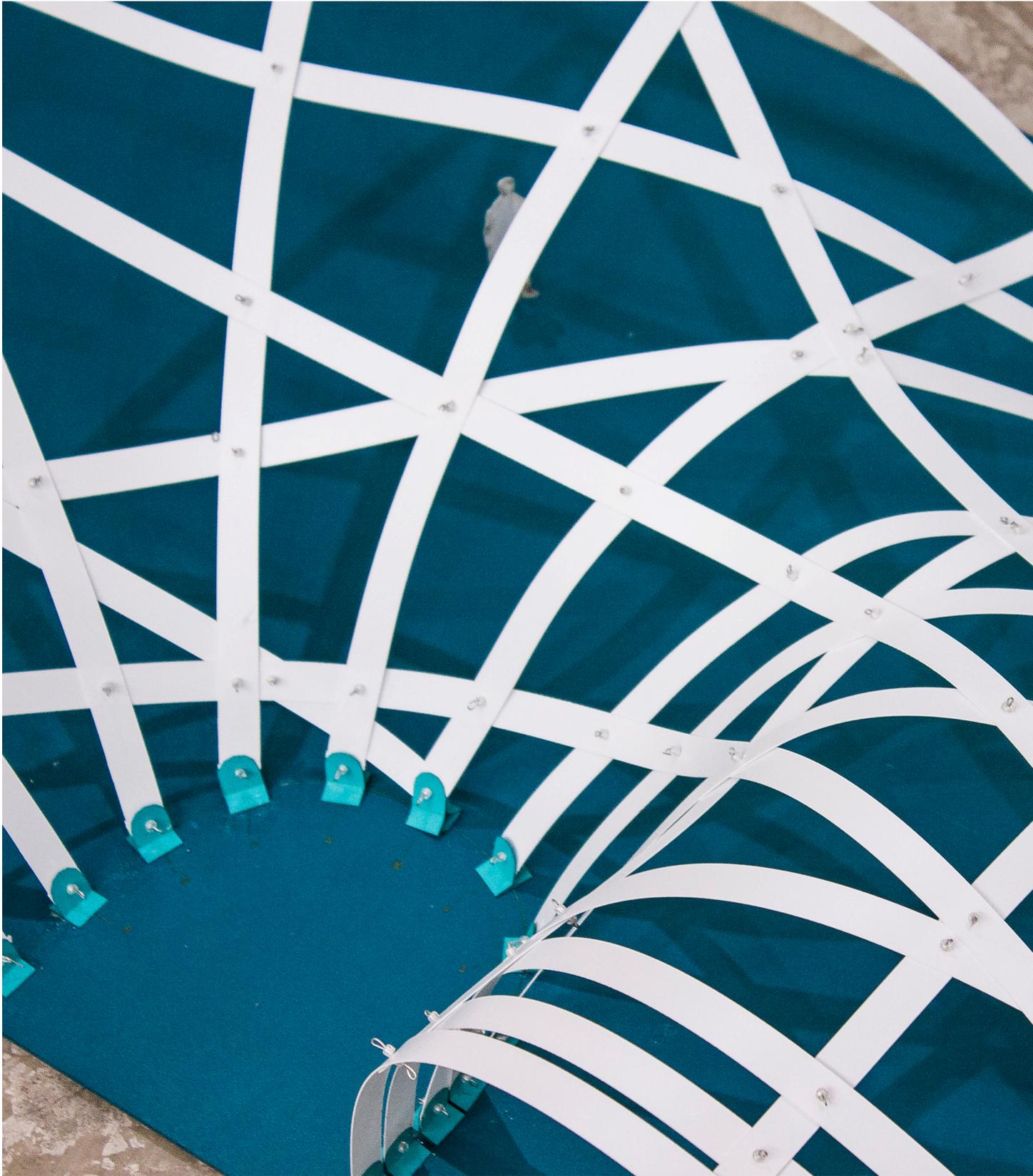


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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





[Figura 1.1] Primer prototipo físico del cascarón reticular geodésico de flexión activa. Realizado en escala 1:10 con barras de estireno laminado de 0.45mm de espesor. Realizado durante práctica profesional en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM con ayuda de Miguel Barón.

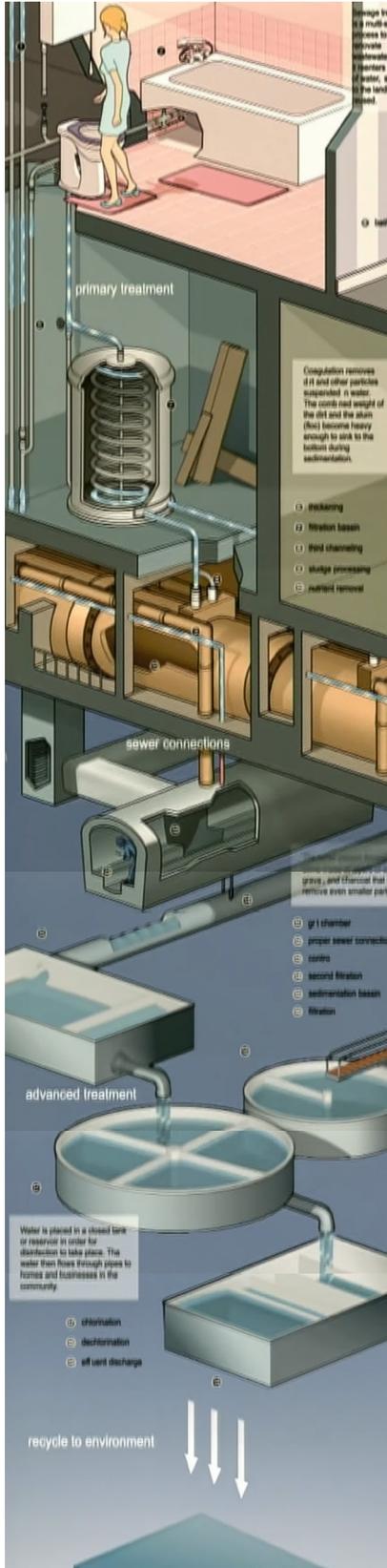
Video del proceso disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=-B90gAMeazg&ab_channel=erikmolina

1.Introducción

En este proyecto de investigación se abordan temas en la intersección entre el diseño y la tecnología como: diseño computacional, diseño paramétrico, estructuras ligeras, optimización en arquitectura y fabricación digital. Toma como caso de estudio un sistema constructivo-estructural al que se llamará Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa (CRGFA), que se caracteriza por tener una geometría basada en una superficie de doble curvatura formada por barras geodésicas cuya geometría constructiva es lograda mediante la deformación elástica de elementos rectos. Esta investigación tiene un carácter multidisciplinario, se citan autores en los campos de diseño, ingenierías, ciencias formales, ciencias naturales, ciencias humanas y sociales y actores de la academia, la industria y la investigación independiente. Tratar la génesis técnica escapa a la disciplina arquitectónica con cuestiones como: ¿cómo se configura el objeto antropogénico? ¿qué relación hay entre lo humano, su entorno "natural" y el mundo "artificial"? ¿qué nuevas interpretaciones del fenómeno de lo real pueden emerger de la interacción de lo técnico y lo filosófico? Estas preguntas conducen este trabajo de investigación técnica atravesada por ejes teóricos críticos.

1.1.Metodología

En este trabajo de investigación se abre y expone proceso creativo de un objeto técnico: el Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa. En torno a él se desarrolla una reflexión sobre la intersección entre lo técnico y lo teórico. Lograr esta intersección implica una base teórica-crítica consistente y a la vez un entendimiento meticuloso de los aspectos técnicos. La simultaneidad de estas perspectivas permite la emergencia de nuevas interpretaciones de cómo lo técnico surge, toma forma y se concreta. Esto se describe en primera instancia desde el pensamiento técnico ubicado en el estado del arte del diseño computacional



y las estructuras ligeras con los campos de investigación de flexión activa, optimización de estructuras y fabricación basada en el auto-ensamblaje. En segunda instancia se profundiza desde la filosofía de la tecnología mediante herramientas teóricas como la ontología de los ensambles sociotécnicos y la teoría cyborg. Las reflexiones que de aquí emergen contribuyen desde el gremio arquitectónico a nuevos entendimientos de las complejas realidades sociotécnicas que habitamos.

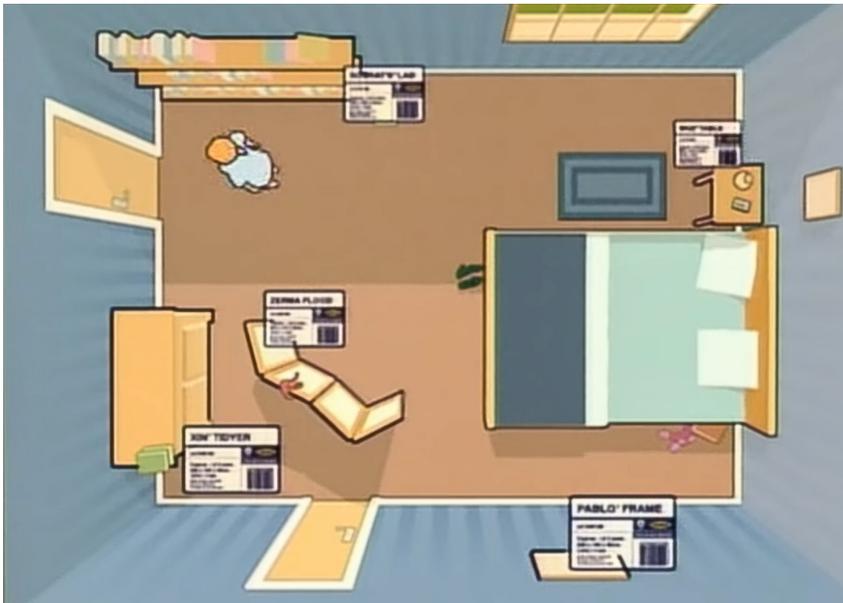
1.2.Marco teórico

Si quien lee este texto realiza el ejercicio imaginativo de pensar en los objetos que le rodean, y por cada uno de esos objetos trata de identificar sus componentes y además cómo esos componentes son el resultado de un entramado complejo de procesos, probablemente se percate de que este ejercicio se puede extender indefinidamente. Lo más probable es que este texto esté siendo leído en la pantalla de un dispositivo computacional con conexión a internet, también es muy probable que quien lee el texto porte indumentaria fabricada industrialmente en otra parte del mundo, que tenga al alcance de la extensión de una mano decenas de objetos que son también resultado de procesos industriales y mercantiles, una intención de diseño y una historia de evolución técnica. Es probable que esta lectura suceda en una habitación, dentro de una edificación, con componentes de acero, concreto y madera, traídos de minas a cielo abierto en el norte de México, y monocultivos de pino en sudamérica. También es muy probable que dicha edificación se encuentre en una ciudad, con red vial, eléctrica, hidráulica y de datos. Si la persona que lee este texto utiliza alguna modificación corporal como anteojos, medicamentos, modificadores cosméticos, o prótesis, podríamos afirmar que dicho cuerpo está alterado tecnológicamente, y que por lo tanto es un cyborg: un ensamble de lo humano y lo técnico. Si mediante diferentes operaciones ergonómicas se ensambla y desensambla (física o cognitivamente) con objetos: una silla, una prenda, un utensilio de cocina, un medio audiovisual, entonces podemos identificar una individualidad flexible, que al conectarse con diferentes sistemas deja de ser individualidad, para transformarse en colectividad cyborg. Si pensamos que la mayor parte de nuestras vidas "humanas" las pasamos ensamblados con todo tipo de objetos, y que estos objetos median nuestras relaciones humanas, entonces exponemos que lo técnico nos es simultáneamente de una familiaridad cotidiana pero también profundamente desconocido.

Desde esta reflexión podríamos afirmar que quien se dedica al diseño, no diseña desde la creatividad individual, el discurso no surge de la persona, sino que la acción creativa atraviesa a la persona, es dada, o impuesta, por grandes estructuras en la escala de lo social, lo cultural y lo económico, pero que a su vez son constituidas por una multiplicidad de interacciones en la pequeña escala. En la práctica creativa no asignamos formas y sustancias, sino que existe un conjunto limitado

de opciones dadas por la industria, el mercado, y las instituciones, donde nuestra tarea es asignar la pieza existente a un lugar que en cierta medida le corresponda. "El espacio" no es la materia prima de "el arquitecto": la materia-forma ya está dada, y nosotros (también como materias-formas) interactuamos con estas con las primeras cuyas estructuras y relaciones son tan grandes e incontrolables, que más bien son ellas las que nos dan forma a nosotros.

En este marco teórico por un lado se explora a detalle el conocimiento técnico contenido en el proceso creativo, por otro lado se expone su realidad sociopolítica y filosófica. En lo filosófico y sociopolítico se toma el trabajo de teóricos de los que destacan Simondon, Bijker, Feenberg, Oldenziel, Baird y De Landa. En lo técnico se toman autores entre los que destacan Otto, Linkwitz, Fuller, Lienhard, Wortmann, y Tibbits. Las relaciones que se trazan entre estos grupos teóricos ayudan a explicar el diseño computacional como metodología y como movimiento. En las dos secciones a continuación se discuten estos temas.



[Figura 1.3] Las imágenes en estas páginas pertenecen al video musical del grupo Noruego Røyksopp (2002) "Remind Me", donde se muestra la rutina de una mujer en reino unido, en formato de diagramas tridimensionales animados que van diseccionando el medio "artificial" en el que se desenvuelve su vida cotidiana. Los diagramas evidencian realidades técnicas que convencionalmente damos por hecho, por ejemplo la relación entre el agua usada en el baño y su recorrido en el ciclo del agua, o también las instalaciones hidráulicas en la cocina, el mobiliario, los niveles de una vivienda multifamiliar, y su relación con la red urbana de transporte. Se muestra la relación entre sistemas anatómicos humanos como la audición en interacción con dispositivos y redes tecnológicas que abarcan hasta lo global. Las transiciones entre objetos acciones y escalas dejan al descubierto la inherencia entre lo técnico y lo humano. Video disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=VF8LMQQ0rEw&t=38s&ab_channel=gremlin133 . Créditos de las imágenes para Houplan & DeCrécy (2002)

1.2.1. Filosofía de la tecnología

Para sostener esta investigación en un cuerpo teórico robusto y crítico se toman trabajos sobre Filosofía de la Tecnología¹ (FT), desde los que se cuestiona el dogmatismo, determinismo y reduccionismo que con frecuencia están sustentando las disciplinas técnicas. El enfoque en la intersección entre lo técnico y lo filosófico hace más adecuada a la FT¹ para estudiar a detalle los aspectos técnicos, y sus dimensiones teórica, epistémica, sociopolítica y cultural del *diseño computacional* y las *estructuras ligeras*, entenderlo contextualmente, y generar nuevos discursos y lecturas de lo técnico/tecnológico en el gremio arquitectónico.

La discusión se ordena en cinco temas: crítica al pensamiento positivista, tecnología y cultura, construcción social de la tecnología, Tecnosociedad, y teoría crítica de la tecnología. En cada sección se profundiza sobre la relación que hay entre la tecnología y diferentes dimensiones de la existencia humana, con la intención no sólo de explicar la ontogénesis del objeto técnico, sino adquirir una perspectiva más amplia desde el estudio de los ensamblajes sociotécnicos.

1.3.1.1. Crítica al pensamiento positivista

El positivismo o empirismo lógico (Radder, 2009; Idhe, 2009) equipara ciencia con verdad, y afirma que sólo la tecnología basada en la ciencia puede traer progreso material y social. Estas ideas son aún comunes (aunque desafiadas constantemente) entre científicos, tecnólogos, elaboradores de políticas públicas, políticos y el público en general. El positivismo busca unificar las metodologías científicas con métodos cuantitativos, en el debate ontológico esto denota posiciones dentro del materialismo mecanicista y reduccionismo². El positivismo toma el éxito factual de la aproximación científica como justificación epistémica y legitimación social; de esto surge una imagen de la ciencia a-histórica, a-cultural, y libre de contexto.

Debates más recientes sobre la práctica científica (Radder, 2009) señalan que el conocimiento científico nunca es neutral ni universalmente válido, sino construido socialmente con base en objetivos sociales particulares e intereses sujetos a negociación social. La "validez" de los artefactos y sistemas tecnológicos se reconoce como socialmente construida mediante la negociación de actores individuales e institucionales. El constructivismo enfatiza que no es posible tener una unidad metodológica y epistemológica, sino una multiplicidad ontológica del conocimiento. El diseño tecnológico, el significado social y la racionalidad funcional (Feenberg, 2010) son dimensiones de la tecnología inherentemente entrelazadas. La noción de racionalidad pura, es sólo posible desde una descontextualización del trabajo. Como sugiere Gremmen (2009) la ciencia y la tecnología son formas de cultura, y su desarrollo histórico no es lineal.

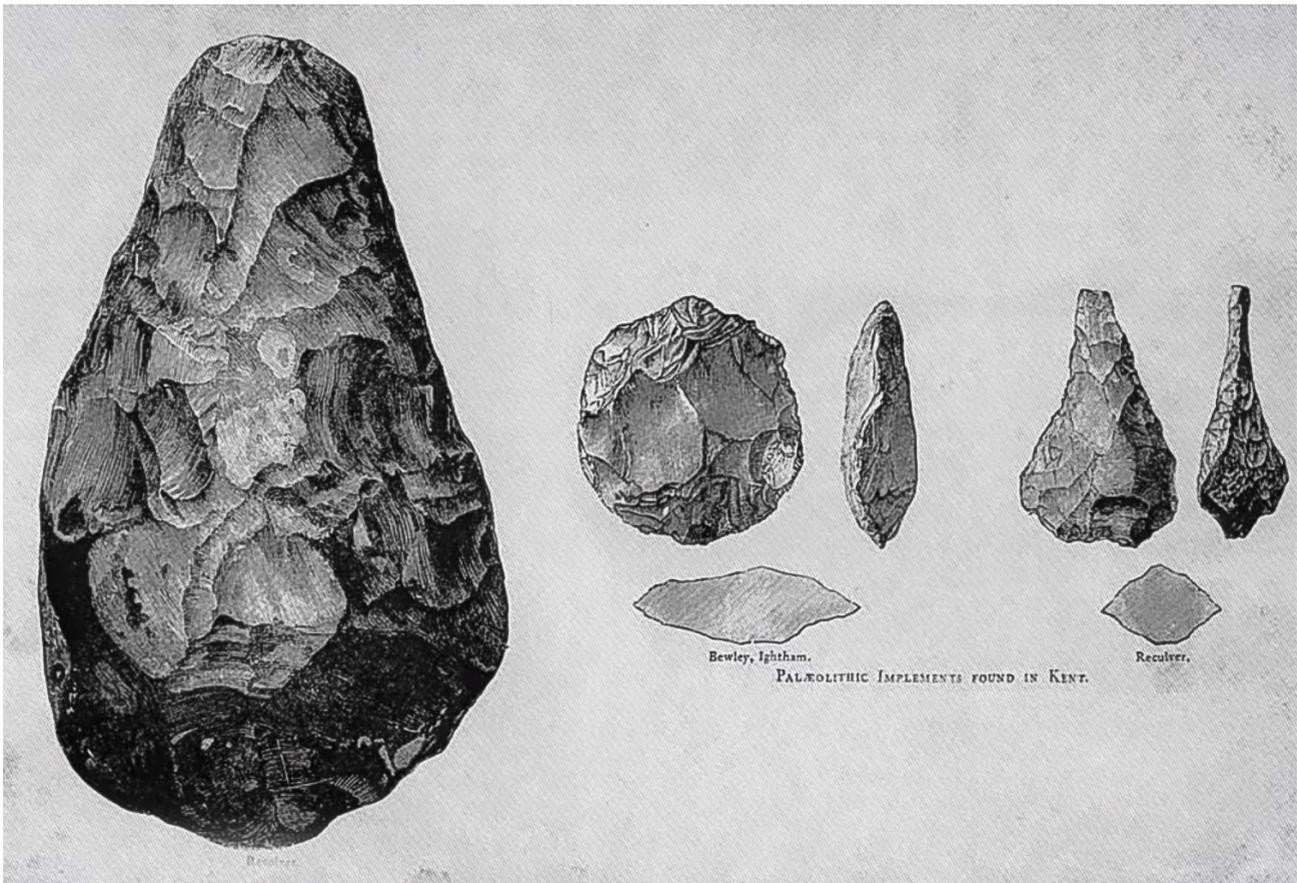
1. La Filosofía de la Tecnología (Bijker, 2009) se ha vuelto central en la polinización cruzada de la filosofía contemporánea. Val dusek (2009) identifica tres corrientes filosóficas primordiales en la que sostienen a la filosofía de la tecnología: Fenomenología y hermenéutica, Marxismo y Teoría Crítica, y Construcción social, sin embargo identifica influencia desde muchas otras disciplinas filosóficas (filosofía analítica, lingüística, tradiciones fenomenológica, existencial y hermenéutica, constructivismo, posmodernismo, pragmatismo. Integración de la ética y política filosóficas, y métodos de epistemología, filosofía de la ciencia, lógica, lingüística y filosofía procesual).

2. Horkheimer y Adorno (1944) critican la hostilidad del postulado baconiano de la *scientia universalis* (ciencia universal) hacia el pluralismo de los campos de investigación. La multiplicidad queda reducida a posición y estructura, la historia a hechos y las cosas a materia. La lógica, como gran escuela de unificación, ofrece la calculabilidad del mundo que es una equiparación mitologizante de las ideas con los números, manteniendo un empeño de la destrucción de las cualidades.

1.3.1.2. Tecnocultura

Es fácil identificar una relación de creador y creación entre humano y herramienta, pero esta relación puede revertirse al considerar el efecto de las tecnologías en la evolución humana. El uso de herramientas, indumentaria, refugio y otros objetos antropogénicos (tecnologías) tiene tal efecto en las dimensiones cultural e incluso biológica de la humanidad, que podemos entenderlos como entidades que evolucionan en paralelo y se co-producen. La domesticación de los cereales, como ejemplo de biotecnología, tuvo un enorme efecto en la sedentarización de los grupos humanos. Desde una perspectiva antropológica (Idhe, 2009), la tecnología antecede al homo sapiens, dado que nuestros ancestros usaron tecnologías más de un millón de atrás. Las herramientas características de la edad de piedra pueden rastrearse desde antes de la aparición del Homo Erectus, sin embargo otras tecnologías, como el uso de redes, fibras y maderas son incluso anteriores: la lanza de madera apareció 400,000 años a.e.c. y las hachas de mano [Figura 1.4], 1,000,000 de años a.e.c. La domesticación de los granos ocurrió en diferentes partes del mundo entre los años 8000 y 10,000 a.e.c. en Asia Central, el Oriente Medio y Mesoamérica con el trigo, el arroz y el maíz que sufrieron hipertrofismo como resultado de la domesticación, es decir, sucedió una influencia recíproca.

[Figura 1.4] Se atribuye el uso de hachas de mano de industria lítica achelense por el Homo Erectus en África hace 1.6 millones de años, otras evidencias paleoantropológicas ubican el uso de herramientas de la misma familia por el Homo habilis en China hace 2.1 millones de años. (PBS Eons, 2019) Imagen de la misma fuente, video completo disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=FFI50iSPWeI&ab_channel=PBSEons



Gilbert Simondon (1958) desafía la oposición entre lo cultural y lo tecnológico, entre lo humano y la máquina, planteando que en los objetos técnicos existe una realidad humana encapsulada. La causa de alienación más fuerte en el mundo contemporáneo reside en incompreensión de la máquina, causada por el desconocimiento de su naturaleza y esencia, y su ausencia del mundo de significados, valores y conceptos que conforman la cultura.

"La alienación fundamental reside en la ruptura que ocurre entre la ontogénesis del objeto técnico y su existencia. Los objetos técnicos que producen una mayor alienación son aquellos diseñados para usuarios ignorantes. Estos objetos progresivamente se deterioran y devalúan porque sólo pueden distanciarse de su condición perfecta inicial. Por el contrario, los objetos técnicos que no están sujetos a la separación de construcción y uso, pueden ser reparados, completados y mejorados mediante la acción técnica. Las condiciones económicas amplifican y estabilizan esta alienación: el objeto técnico no le pertenece (en términos de propiedad económica ni en términos de conocimiento técnico) a quien lo usa. La relación entonces se vuelve muy frágil, externa y precaria." (Simondon 1958)

La máquina es una estructura funcionante donde residen rasgos de la realidad humana. La perfección de la máquina no depende de su nivel de automaticidad, sino en su sensibilidad a información exterior, que le permite intercambiar información y acciones dentro de ensambles más grandes, que involucran individuos humanos, otras máquinas y el entorno.

1.3.1.3. Construcción social de la tecnología y el conocimiento

En una visión determinista (Oldenzel, 1994) es común decir que el desarrollo social es dado por la tecnología, ya que esta aparenta ser concreta, tangible y fáctica, olvidando que producimos y adscribimos significado para/con ella. No es un hecho irreductible, sino historia cristalizada del empeño humano y social. La tecnología es una forma materializada de relaciones sociales y políticas; artefactos, conocimiento y redes sociales que están entretrejidas son siempre el medio para conflicto y negociaciones. Esta visión diverge de la idea popular anterior de que la tecnología es sólo objeto o artefacto.

El estudio de la construcción social de la ciencia (Collins, 2009) se refiere a las influencias sociales en el contenido del conocimiento científico. Una revolución paradigmática sucede en el nivel de la comunidad, y no del individuo. El concepto de "construcción social de la realidad" (Bijker, 2009) fue utilizado por primera vez en 1966 por Berger y Luckmann en su "tratado de sociología del conocimiento", que habla sobre el conocimiento ordinario. En los años 70 se desarrolló la teoría de la construcción social de los hechos científicos y en los años 80 la construcción

social de los objetos técnicos. La construcción social de la tecnología surge de tres cuerpos del conocimiento: el movimiento Ciencia-Tecnología-Sociedad, la sociología del conocimiento científico y la historia de la tecnología². La sociedad contemporánea no puede ser cabalmente entendida sin considerar el rol de la ciencia y la tecnología y politizar el entendimiento de la cultura tecnológica: mostrar la dimensión política oculta y someterla a discusión para no sólo entender tanto la ontogénesis técnica, como la cultura tecnológica conformada por ensambles sociotécnicos.

Meijers y De Vries (2009) plantean una crítica a la idea popular de que la tecnología es primordialmente una forma de ciencia natural aplicada. Aunque la tecnología puede tener conceptos derivados de la ciencia, también contiene datos empíricos, teorías tecnológicas y conocimiento tácito, el “diseño” es estudiado como común denominador en el conocimiento tecnológico, y conocimiento colectivo que es materializado en normas y estándares socialmente construidas con base en juicios de valor. La ciencia física moderna (Idhe, 2009) se consolidó en el siglo XVII, sin embargo el origen de la tecnología es mucho más antiguo. Gran parte de la tecnología del pasado (Boon, 2009) fue desarrollada sin la contribución de las ciencias y sin la necesidad de un entendimiento científico, apoyándose en otros tipos de conocimiento.

El conocimiento tecnológico (Meijers & De Vries, 2009) no busca la reproducción universal, sino la resolución de problemas en contextos dados. Tampoco puede expresarse en términos puramente proposicionales, la habilidad implica conocimiento tácito, que es cualitativo y complejo. La representación técnica en dibujos, por ejemplo, contiene conocimiento que es imposible expresar proposicionalmente, además los artefactos creados pueden contener conocimiento en sí mismos. Admitir que los objetos tecnológicos (Baird, 2004) tienen un estatus epistémico, que son conocimiento, agranda la capacidad de nuestro aparato cognitivo para aproximarse a una comprensión del mundo. La validez contemporánea de la frontera entre lo tecnológico y lo científico o lo filosófico es afectada al incluir lo material como epistemológico. Es común decir que un instrumento de medición extrae información de un espécimen, sin embargo es más filosóficamente prudente decir que un instrumento interactuando con un espécimen genera una señal, que es transformada para generar información y conocimiento. Los instrumentos crean fenómenos, y al hacerlo constituyen conocimiento funcionante. Para transformar una señal en conocimiento es necesaria la contribución humana del pensamiento. El instrumento actúa como un puente conector entre las ideas y la realidad material.

De acuerdo a un paradigma semántico (Baird, 2004) un modelo físico puede hacer un trabajo epistemológico similar al de las teorías. El modelo físico puede ser una mejor representación que la teoría cuando es regido por las mismas reglas que el fenómeno estudiado, o permite exploraciones sin las restricciones

proposicionales de la teoría, permitiendo reemplazar la razón proposicional por una razón material. En un modelo físico se pueden hacer operaciones teóricas con bits de materia³, en vez de símbolos. Un modelo representa una porción del mundo, con la que se puede denotar, demostrar e interpretar. El modelo puede demostrar, explicar y predecir, en el caso de modelos conceptuales la demostración suele ser lógica-matemática. En los modelos físicos se pueden hacer demostraciones causales o geométricas. Los modelos materiales pueden ser manipulados físicamente, cosa que es particularmente importante cuando las manipulaciones conceptuales son imposibles, ya sea por falta de teoría, o por la dificultad de realizar manipulaciones analíticas-numéricas⁴. Los construccionistas sociales (Boon, 2009) argumentan que los factores sociales juegan un rol que no puede ser eliminado de los métodos en las ciencias. Las teorías y los instrumentos se desarrollan recíprocamente. Los instrumentos en vez de ser "lentes" para ver la realidad, son parte del conocimiento teórico. Las teorías encajan con la realidad, en menor medida por haber logrado un entendimiento de la realidad, y en mayor medida porque hemos creado nuestros instrumentos a la medida de nuestras teorías. Contrario a la tesis Duhem-Quine los datos obtenidos de instrumentos de medición no son suficientes para demostrar o socavar una hipótesis. Karl Popper (Meijers & DeVries, 2009) desafió la imagen positivista de la ciencia, argumentando que los resultados experimentales están siempre sujetos a interpretaciones a la luz de las teorías: es nuestro paradigma (y no la observación pura) la base de nuestro conocimiento del mundo, y nuestras observaciones existen en la medida en que emergen dentro del paradigma.

3. Penrose y Von Neumann (Tibbits, 2007) demostraron que las cualidades esenciales de la reproducción natural y el auto-ensamblaje celular eran posibles en sistemas mecánicos reales. La idea de poder programar en el mundo físico condujo a un nuevo modelo de cómputo llamado cómputo espacial y la implementación de un lenguaje de programación llamado Autómata Lógica Asíncrona Reconfigurable (RALA). La lógica digital puede estar compuesta exclusivamente de entidades geométricas físicas, que tengan transformaciones en relación directa con los componentes colocados anteriormente. Cuando las piezas son colocadas sucesiva y exitosamente se genera una secuencia lógica. Las piezas reciben inputs, sufren transformaciones y generan outputs.

4. Otto y su equipo construyeron modelos (maquetas físicas) mecánicamente análogos a los objetos a construir. En estas maquetas los aparatos de medición (de fuerzas y desplazamientos) estaban integrados; es decir el objeto se medía a sí mismo. Nada en la construcción del modelo era arbitraria, todas las variables eran escaladas, combinando el modelo con el método de medición precisa en una especie de "cómputo físico", donde el objeto es un aparato de procesamiento de información con deformaciones que ocurrían en la escala micro y eran medidos por los diferentes métodos (fotografía y dinamómetros) que generaban una enorme cantidad de información en capas, capturando la forma en movimiento y el cambio con respecto al tiempo.

1.3.1.4. Tecnosociedad

"La tecnología es ubicua, está en todos lados, da forma a nuestra conducta, afecta nuestra salud, la forma en que consumimos, cómo interactuamos, y los métodos con que ejercemos control unos a otros. La tecnología no emerge de una intención innovadora neutra, sino de estructuras existentes que reproduce (...)" (Bijker, 1992)

La tecnología como mundo, como espacio habitable, (Feenberg, 2010) configura a sus habitantes. Es comparable a las leyes y tradiciones que en la antigüedad moldeaban un tipo humano deseado, privilegiando ciertas dimensiones de su "naturaleza", mediando relaciones, acciones políticas, ideas y valores. Vivimos con (y siendo parte de) tecnologías que organizan y configuran la vida humana. El diseño tecnológico es inseparable de valores y significados. Una hermenéutica de la tecnología podría extraer los significados implícitos en los dispositivos que usamos y los rituales que prescriben. Cómo vivimos es en gran medida influenciado por cómo configuramos y diseñamos nuestras ciudades,

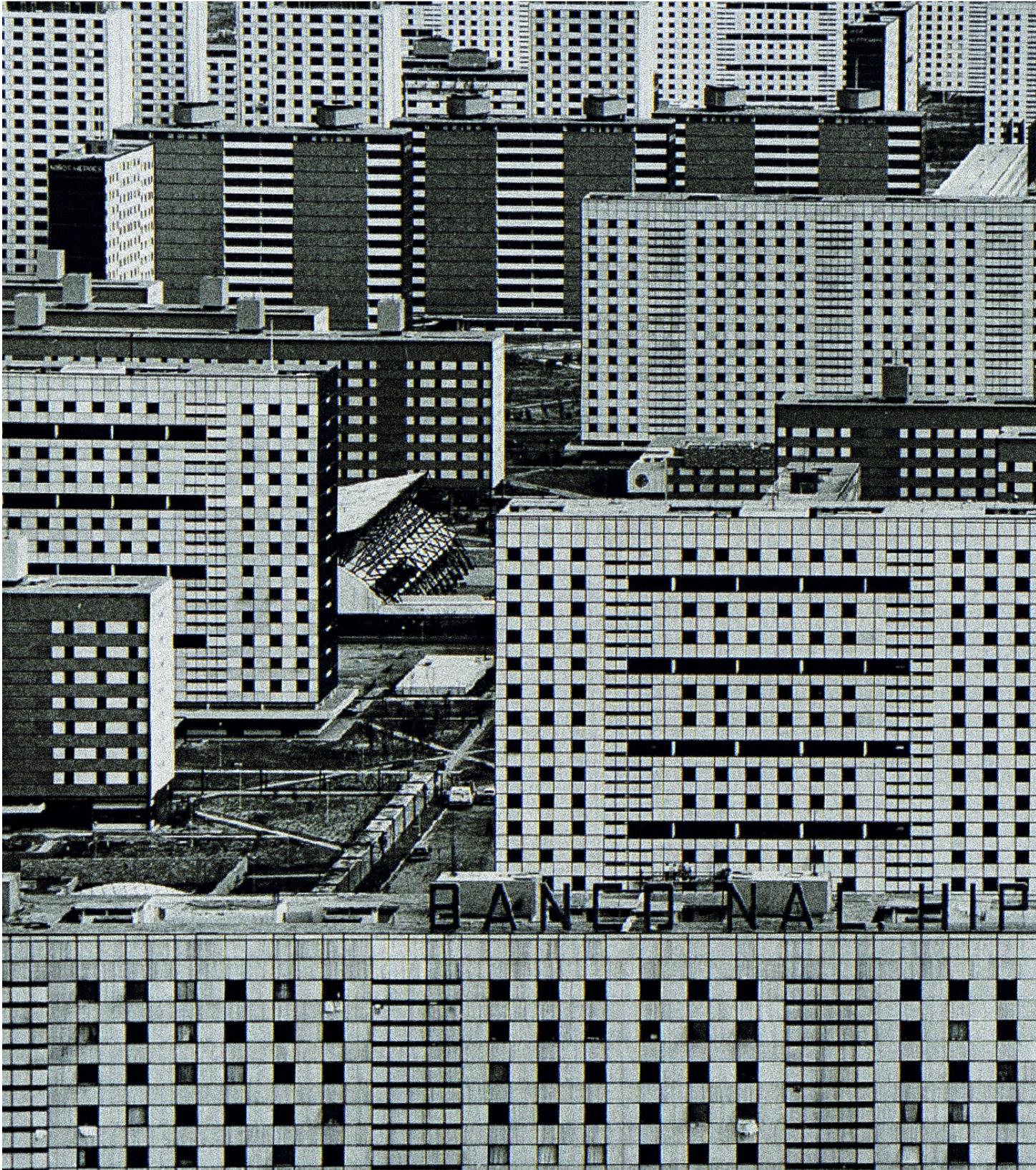
sistemas de transporte, medios de comunicación y producción. Bijker y Law (1992) sostienen que nuestras tecnologías reflejan a nuestras sociedades, reproducen y encarnan las interacciones complejas de factores técnicos, económicos, políticos y profesionales, son configuradas por las negociaciones complejas conformadas socialmente. Cuando un artefacto es diseñado y construido se involucra política, economía, mecánica de materiales, nociones de lo bello y lo deseable, preferencias profesionales, prejuicio y habilidad, herramientas de diseño, materiales disponibles, teorías sobre el comportamiento del entorno natural, por ende, son configuradas por un rango de factores heterogéneos.

Los objetos técnicos (Simondon, 1958) han sido juzgados como instrumentos, coadyuvantes o productos del trabajo, sin embargo, para permitir la aparición directa de lo humano en el objeto técnico uno podría revertirse ese juicio, entendiendo al trabajo como una fase de lo técnico. El trabajo ocurre cuando el sujeto presta su individualidad para organizar operaciones, y al hacerlo es un portador de herramientas, sin embargo cuando el objeto técnico es concretizado, la relación entre sujeto y naturaleza sucede al nivel del objeto técnico. Un objeto técnico concretizado es una relación técnica llamada transindividual.

El objeto técnico apareció en un mundo de estructuras sociales formadas por las relaciones de trabajo, y se asimiló a ellas en vez de crear un mundo con estructuras nuevas. Por eso la máquina es conocida por su funcionamiento para el trabajo y no en términos de entendimiento técnico. La caja negra del trabajo se transfirió a la máquina: por lo que su funcionamiento, prevalencia y significación (del qué y cómo opera la misma máquina) es una zona obscurecida. El humano sabe lo que entra y lo que sale de la máquina, pero no lo que sucede dentro de ella; la obscuridad del antiguo esquema hilemórfico⁵ se preserva. Comandar una máquina permanece como una acción externa y ajena cuando el comando consiste en la activación de acuerdo a un ajuste preestablecido y planificado para operar dentro de la construcción del objeto técnico, resultando en trabajo alienante. A diferencia del trabajo alienante, la actividad técnica sucede cuando hay un diálogo técnico entre sujetos a través de la máquina: cuando la máquina contiene formas que pueden ser interpretadas por los sujetos que la operan. En esta situación los ensambles técnicos son un medio entre sujetos (transindividual). A menudo la máquina es fabricada como un objeto técnico absoluto, funcional en sí misma, pero pobremente adaptada al intercambio de información con el usuario. La ingeniería humana (o ergonomía) plantea investigaciones muy útiles, pero para ser efectiva necesitaría cuestionar los fundamentos más profundos de la comunicación entre sujeto y máquina. Para que el sujeto pueda elicitar significado de los ensambles técnicos, es necesario entender lo técnico a nivel de colectivo como un acoplador de las capacidades inventivas y organizativas de varios sujetos.

Para abordar esta complejidad, una teoría de ensambles (De Landa, 2006) fue creada por Deleuze en las últimas décadas del s.XX, cuya intención era explicar

5. El esquema hilemórfico (separación entre forma y sustancia) (Simondon, 1958) pertenece al contenido de la cultura occidental y ha sido transmitido desde la antigüedad clásica, generalizado como realidad universal. La ontogénesis hilemórfica presupone la existencia de un principio de individuación antecede al ente.





una amplia variedad de totalidades constituidas de partes heterogéneas: el ensamble no es equivalente al concepto de entero⁶. En este planteamiento, se problematiza el reduccionismo de las ciencias humanas que estudian al individuo, o a la experiencia individual y las que estudian a la sociedad como entidad, presentando los conceptos de micro-reduccionismo y macro-reduccionismo respectivamente. Ejemplos de ensambles humanos (o redes sociotécnicas) son: redes interpersonales, organizaciones institucionales, movimientos sociales, gobiernos centrales, ciudades, etc.

Para dar una idea de la irreductible complejidad social característica del mundo contemporáneo, Manuel De Landa (2006) hace una investigación de ensambles sociotécnicos en diferentes escalas, desde la subpersonal hasta los territorios-nación. Para comprender la complejidad de la micro y la macro escalas, y romper el hábito intelectual de privilegiar una u otra, De Landa hace una clarificación del estatus ontológico de entidades que son actores en las narrativas históricas, mostrando que la multiplicidad de las entidades sociales es una propiedad intensiva y extensiva de la escala. Anthony Giddens (De Landa, 2006) explica que el entero⁶ posee una inextricable unidad, donde hay una determinación estricta entre las partes tratando de trascender la dualidad entre agencia (individualidad) y estructura (colectividad) argumentando a favor de su mutua constitución: la agencia es constituida por su desarrollo en la práctica, y reproduce a la estructura; la estructura es concebida como consistente de procedimientos y rutinas, y recursos materiales y simbólicos, mostrando que ninguna posee una existencia fuera de la otra: el resultado es un entero continuo en el que la agencia y la estructura mutuamente se constituyen en una relación dialéctica.

[Figura 1.4b] En México (Cervantes, 2015) un ejemplo de las operaciones biopolíticas que ordenaban de manera macro el espacio es un urbanismo brutal que destruía lo insalubre, que buscaba ordenar a la población, es el conjunto habitacional de Tlatelolco. La construcción de este centro urbano, no solo dotaba de vivienda a un sector poblacional, también tuvo un carácter de limpieza social; evitar las enfermedades, de destrucción de aquellas zonas denominadas como la "herradura de los tugurios"; ya que éstas impedían el avance sano de la capital. Esta estrategia social responde al incremento de las fuerzas de producción, creando centros habitacionales que reordenan a los individuos, los hace habitar otro tipo de lógicas sociales; máquinas simbólicas en plena transición urbana. Imagen de Moya (1965).

6. Un entero (De Landa, 2006), en la Dialéctica Hegeliana, tiene propiedades irreductibles que emergen de la interacción entre sus partes, y cumple con la propiedad de continuidad.

1.3.1.5. Teoría crítica de la tecnología

La tecnología (Feenberg, 2010) es una de las mayores fuentes de poder en las sociedades contemporáneas. La democracia política es en gran parte eclipsada por el enorme poder de quienes controlan los sistemas técnicos en corporaciones, organizaciones militares y asociaciones profesionales (e.g. médicos e ingenieros). Tienen una relación más directa de control con el crecimiento urbano, creación de vivienda, sistemas de transporte, la innovación y nuestra experiencia como usuarios, empleados, pacientes, y consumidores que las instituciones gubernamentales. Las formas contemporáneas de hegemonía están basadas en tipos específicos de mediación técnica sobre una variedad de actividades sociales. La acción técnica es ejercicio de poder, si la sociedad está organizada en torno a la tecnología, esta se convierte en la forma principal de poder. En tal sociedad el autoritarismo se manifiesta en el estrechamiento de la visión y los valores representados en las tecnologías. Abrir la tecnología a un rango más amplio de intereses y valores desencadenará un rediseño para una mayor compatibilidad con lo humano. Una transformación desde abajo podría guiar una reforma radical de la esfera técnica.

La Teoría Crítica de la Tecnología (Feenberg, 2010) es una teoría política de modernidad que pertenece a una tradición filosófica desde Marx hasta Foucault incorporando conceptos de la Escuela de Frankfurt, donde es fundamental el reconocimiento formal de los Derechos Humanos mientras la centralización de las cada vez más poderosas instituciones públicas y organizaciones privadas imponen un orden social autoritario. Marx atribuía este patrón a la racionalidad capitalista de la producción, hoy en día configura muchas instituciones: fábricas, sistemas políticos, grupos académicos, etc. El patrón surgió para mantener el dominio sobre una fuerza de trabajo des-empoderada e inhabilitada. La sociedad de control explicada mediante la prisión panóptica por Foucault, y la sociedad unidimensional por Marcuse, son otros ejemplos.

El diseño y desarrollo tecnológico son configurados por este patrón, para servir como la base material del orden social. Marcuse llamó este concepto el "proyecto" en la base de una "racionalidad técnica". Liberar a la tecnología de este proyecto es una tarea política democrática. Feenberg (2016) incorpora métodos del movimiento Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS) y teoría crítica para estudiar fenómenos en la actualidad relacionados con la tecnología: crítica social, control técnico de la sociedad, movimiento feminista, tecnologías para el control reproductivo, ambientalismo, contaminación, residuos tóxicos, participación política directa, hacking, redes sociales, donde estudia el ejercicio de la agencia política en la esfera técnica: intervención contra conflictos, controversia, reinención, apropiación, diseño participativo, formas híbridas, ciudadanía, grupos sociales subordinados, ideas traídas de diferentes grupos sociales, y grupos sociales nuevos que entran en escena.

Marcuse (Feenberg, 2010) planteaba que la racionalidad tecnológica contemporánea no es universal, sino particular con respecto al capitalismo, con relaciones de clase impresas en el diseño de tecnologías de producción. Un ejemplo es la línea de ensamblaje, donde el diseño mismo busca una administración del trabajo descalificadora y rítmica que incrementa la productividad mediante un control riguroso. La racionalidad tecnológica pasa de la creencia y la ideología a estar incorporada en la estructura misma de las máquinas. Por su parte, Foucault planteaba en su teoría de poder/conocimiento que las formas actuales de opresión se basan no en ideología falsa, sino en el uso de las “verdades” técnicas que sostienen y reproducen formas de hegemonía. Mientras la contingencia de una selección de “verdad” se mantenga oculta, se proyectará la imagen determinística de un orden social técnicamente justificado.

La academia técnica tiende a explicar el desarrollo tecnológico como el resultado de una búsqueda por la eficiencia, sin embargo Feenberg (2010) rechaza esta postura, argumentando a favor de los factores sociales que configuran a los objetos técnicos. En la discusión sobre el movimiento ambiental hay quienes argumentan que mejorando la eficiencia se reducirán los efectos negativos la actividad tecnológica. Sin embargo éste programa es incompatible con la sociedad capitalista: una sociedad obsesionada por el consumo privado entiende el daño ambiental como algo que se negocia a cambio de riqueza y no como base de un bienestar común. Se desafía el concepto de optimalidad en otras secciones de esta investigación, por ejemplo en el capítulo de optimización por autores como Thomas Wortmann.

Si la jerarquía social es una dimensión contingente (fenómeno emergente) del progreso técnico, entonces debe existir una racionalidad alternativa que democratice en vez de centralizar el control. Feenberg (2016) también propone un modelo de programa y antiprograma, donde el programa pertenece a las partes dominantes de una red social, mientras que los anti-programas proliferan de intenciones que son dejadas fuera del programa principal. Su modelo intenta explicar conflicto social a nivel técnico.

La intervención pública en la esfera técnica tiende a ser confrontada con el reclamo de que no corresponde a una racionalidad correcta. ¿Es posible generar un argumento en el que la intervención de personas ordinarias sea legítima en el dominio técnico? La noción de racionalidades múltiples, y una crítica sobre la visión determinista tecnológica donde se reconoce que la eficiencia y las consideraciones técnicas no son suficientes para diseñar un objeto tecnológico apunta en una dirección para responder esta pregunta. Feenberg (2016) afirma que si aspiramos transformar el mundo, esta transformación tendrá lugar al nivel del diseño tecnológico. Este trabajo de investigación se sostiene en gran medida sobre esta afirmación.

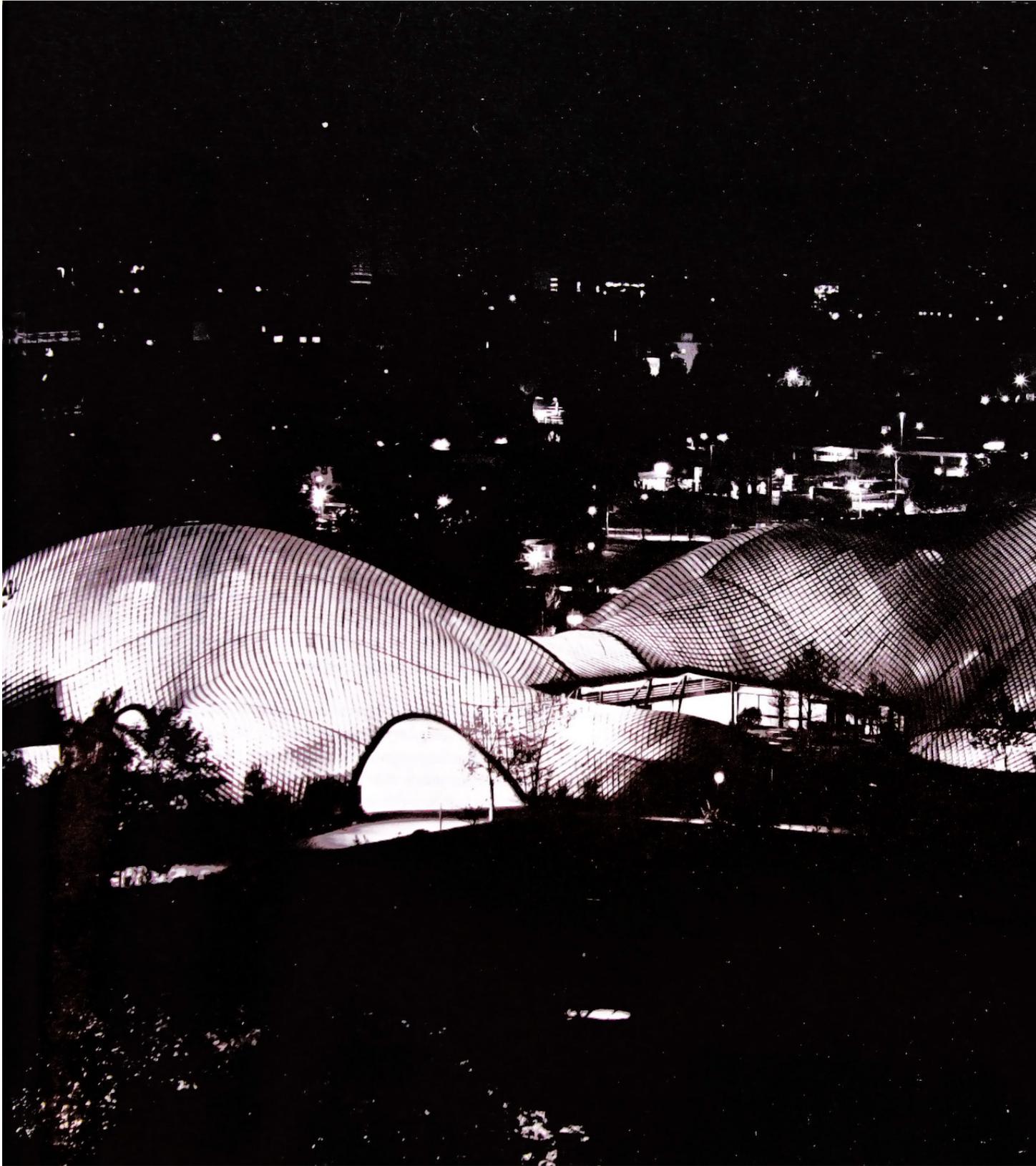
1.3.2. Estructuras ligeras y diseño computacional

En esta sección se describen las cinco características técnicas del Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa: cascarón reticular, geodesia, flexión activa y ensamblaje auto-guiado. La descripción de cada característica abarca: el desarrollo histórico y estado del arte, una descripción técnica a detalle y la aplicación específica en el CRGFA. Esta descripción que liga lo histórico con lo técnico permite entender la innovación no como producto de la invención individual, sino como un proceso que sucede en un entramado complejo de relaciones, sujeto a paradigmas técnicos cambiantes y que están relacionados con organizaciones, grupos sociales e instituciones en un contexto dado. Un resumen se presenta en la tabla a continuación, y posteriormente una explicación más detallada.

<i>Característica técnica</i>	<i>Desarrollo histórico y estado del arte</i>
<i>Cascarón reticular</i>	<p><i>En el s. XIX Shukhov y Gaudí incursionan en las estructuras ligeras.</i></p> <p><i>En 1967 el equipo de investigación en el IL construye un cascarón reticular en Montreal para el auditorio del pabellón Alemán.</i></p> <p><i>En 1971 Frei Otto en el (IL) Kenzo Tange (SEIBU) y Klaus Linkwitz (IAGB) realizan un proyecto de investigación en cascarones reticulares funiculares.</i></p> <p><i>En 1973 se publica el tomo 10 de la revista del IL Gitterschalen, sobre cascarones reticulares incluyendo un método computacional para la simulación funicular.</i></p> <p><i>En 1975, Mannheim, se construye el Multihalle bajo la dirección de Otto, con la colaboración de Linkwitz, Dieter, y las empresas Poppensieker, Ove Aarup & Partners y Ballonfabrik.</i></p> <p><i>En 2009 Kuijvenhoven publica un método de resortes y partículas para la simulación mecánica de cascarones reticulares elásticos que consideraba el fenómeno de flexión activa faltante en las simulaciones de Otto.</i></p>
<i>Geodesia</i>	<p><i>Desde la edad neolítica se construyeron domos con entramados triangulares.</i></p> <p><i>En 1922 Bauersfeld construye la primera estructura moderna triangulada basada en el icosaedro, en Jena, Alemania.</i></p> <p><i>En 1951 Fuller patenta el domo geodésico definiéndolo como “una estructura generalmente esférica donde los elementos interconectados forman un patrón de arcos circulares que se intersectan para formar una retícula en tres sentidos”.</i></p> <p><i>En 1960 Caspar y Klug formulan la teoría de quasi-equivalencia para representar la distribución de moléculas en la cápside el virus TYMV inspirados en la esfera tensegítica de 270 barras de Fuller, y Kroto nombra a la familia de moléculas esféricas de carbono “Fullerenos”.</i></p> <p><i>En 1964 fuller diseña el domo geodésico para la expo Montreal 67.</i></p> <p><i>En 2006 el Instituto Tecnológico Federal Suizo publica investigaciones sobre cascarones reticulares geodésicos de madera.</i></p> <p><i>En la actualidad se utiliza también para la panelización de elementos constructivos en superficies de doble curvatura.</i></p>
<i>Flexión Activa</i>	<p><i>El uso de ramas flexibles es probablemente antecesora a la cestería en las viviendas más antiguas en regiones con escasez de maderas duras, un ejemplo que persiste en la actualidad es la construcción Mudhif al sur de Iraq, que se construye desde hace aproximadamente 5000 años.</i></p> <p><i>En 1887 se documenta por primera vez la Oca por el pueblo Yawalapiti, en la cuenca del Amazonas.</i></p> <p><i>En el s. XIX Shukhov y Gaudí incursionan en las estructuras ligeras.</i></p> <p><i>En la década de 1950 se incursiona en el uso de FRPs, un ejemplo es la Casa del Futuro en 1954.</i></p> <p><i>En 2012 Flexión Activa es establecida como grupo de estudio dentro del IASS en el grupo 15 Morfología Estructural.</i></p> <p><i>En 2016 se construye un prototipo de investigación sobre Flexión Activa del ICD y el ITKE en Stuttgart.</i></p> <p><i>En 2017 se construye el ZCB Pabellón de Bambú en la Universidad de Hong Kong.</i></p> <p><i>En la actualidad es un área de investigación muy prolífica.</i></p>
<i>Ensamblaje auto-guiado</i>	<p><i>En la década de 1940 John Von Neumann realiza investigación en la auto-replicación de sistemas biomoleculares.</i></p> <p><i>En 2007 Tibbits publica en CBA del MIT su teoría de cómputo espacial y auto-ensamblaje llamado Logic Matter.</i></p>

[Figura 1.5] Tabla que resume el contenido la sección 1.2.2. Identifica cuatro características técnicas del Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa, el estado del arte, una descripción técnica y su aplicación. Las referencias correspondientes se encuentran en el cuerpo de la sección.

Descripción técnica	Aplicación en CRGFA
<p>La forma de doble curvatura de la superficie de un cascarón permite la transmisión de cargas en esfuerzos-membrana. Un cascarón reticular es un entramado de barras y uniones rígidas curvado tridimensionalmente. Los cascarones investigados por el equipo de Otto eran optimizados mediante el método de la red colgante que permitía encontrar la forma libre de momento flexionante, además estaban formados por una retícula regular que al deformarse generaba la geometría compleja de la estructura, método constructivo que permitía un bajo costo.</p>	<p>La geometría base del CRGFA es una superficie de doble curvatura. La superficie es aproximada por barra interconectadas con nodos. A diferencia de los cascarones reticulares de Otto y su equipo, el CRGFA tiene un entramado irregular, y nodos de tipo articulado.</p>
<p>Una línea geodésica es el equivalente en una superficie curva a una línea recta en una superficie plana. La curva geodésica es la forma de equilibrio estático a una barra elástica constreñida a una superficie curva. En los domos de Fuller, el trazo geodésico era utilizado para encontrar el entramado de barras en módulos triangulares que se aproximase a un entramado regular sobre una esfera.</p>	<p>La geometría de las barras en el CRGFA es encontrada mediante el trazo de geodésicas sobre la superficie base. Este método permite que la construcción pueda ser realizada a partir de barras rectas que se deforman para aproximarse a la superficie. Que las barras en estado de reposo sean rectas reduce significativamente los costos de fabricación.</p>
<p>Estructuras compuestas por elementos lineales o superficiales que adquieren su geometría mediante deformación elástica. No es posible imponer una forma arbitraria, sino que tal forma debe ser definida dentro de las condiciones del material y los componentes. El comportamiento estructural es no lineal y actualmente se utiliza la simulación dinámica para su análisis. Los materiales con un límite elástico mayor son más adecuados.</p>	<p>El CRGFA se construye uniendo y deformando elásticamente componentes rectos. La superficie del CRGFA debe diseñarse considerando los radios mínimos de deformación de los componentes usados. Es posible también la deformación plástica de las barras.</p>
<p>Logic Matter es un sistema de módulos físicos que se combinan para computar espacialmente la ubicación de las piezas subsecuentes. El sistema tiene información local contenida en la geometría de los módulos. Tibbits desarrolla una secuencia de ensamblaje donde los nodos necesitan conectarse con múltiples vecinos en una tipología de matriz (que es más eficiente que una tipología de cadena).</p>	<p>En el CRGFA se usa una secuencia de ensamblaje guiada por información contenida en los componentes. No necesario utilizar referentes de medición para verificar la geometría durante el proceso, la geometría es el resultado final de los componentes interactuando. A diferencia del trabajo de Tibbits, los componentes no se ensamblan automáticamente, sino que son ensamblados por un actor externo (constructor), por lo que se utiliza el término ensamblaje auto-guiado y no auto-ensamblaje.</p>





1.3.2.1.Cascarón reticular

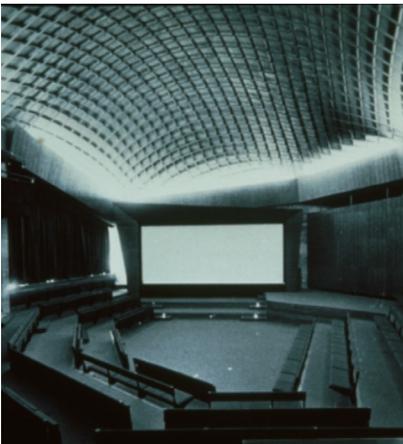
1.3.2.1.1.Desarrollo histórico y estado del arte

Entre 1971 y 1973 (Otto et al., 1973) en el IL (Instituto de Estructuras de Superficie Ligeras de la Universidad de Stuttgart) bajo la dirección de Frei Otto, Kenzo Tange y Takeshi Hasegawa, financiado por la compañía de construcción japonesa SEIBU y en colaboración con el IAGB (Instituto de Aplicación de la Geodesia en la Construcción bajo la dirección de Kaus Linkwitz) se llevó a cabo un proyecto de investigación sobre cascarones reticulares. En su primera publicación definieron al cascarón reticular como: "Un entramado de barras y uniones rígidas curvado tridimensionalmente". La forma ideal se define invirtiendo la geometría de una red colgante, así como la inversión de una catenaria genera la forma de un arco libre de momentos (flexión). La red colgante inversa genera la superficie de un cascarón con la misma propiedad. Para los prototipos en escala real fabricaron primero retículas planas con módulos regulares (cuadrados) y articulaciones atornilladas en los extremos que posteriormente se deformaban para obtener la forma tridimensional de doble curvatura.

El mismo equipo de investigación (Burkhardt et al., 1978) construyó en Mannheim, Alemania, en el Herzogenriedpark un gran espacio de usos múltiples [Figuras 1.6, 1.10, 1.11] donde se alojó la exhibición federal de jardinería y otros eventos. El proyecto permitió poner en práctica en una escala mucho mayor lo investigado desde 1971.

La construcción sucedió (Burkhardt et al., 1978) gracias a la colaboración de varios actores. La empresa constructora Poppensieker en Löhne fue seleccionada para la construcción de la retícula del cascarón. El IAGB bajo la dirección de Klaus Linkwitz y Hans Dieter Preuss se encargó de calcular computacionalmente la red colgante para la geometría y los esfuerzos, lo que permitió por primera vez un nivel de exactitud y detalle tal que los planos de producción pudieron realizarse por computadora. También colaboró el despacho inglés de ingeniería OAP (Ove Aarup & Asociados), escribe Otto que "en 1968 Ove Aarup con gran interés estudió las investigaciones del instituto y dijo que estaba listo para efectuar los planes para tal edificación con toda la fuerza de su organización." OAP fue seleccionado para el análisis de cargas y el detallado ingenieril de la construcción. La empresa Ballonfabrik Augsburg se encargó de la piel del cascarón con un resultado impecable.

[Figura 1.6] Cascarón reticular en Mannheim, donde se libra un claro de más de 60 metros con una doble retícula de barras de madera con sección de 5cm x 5cm. (Otto et al., 1973)



[Figura 1.7] retícula plana antes de colocación y deformación. Las uniones atornilladas permiten el movimiento de tijera que hace posible la deformación de los cuadros de la forma plana a rombos en la forma de doble curvatura. La figura 7 se muestra el entramado de barras ya colocado, y con su forma final. Imagen de Kleinmanns (2017)

[Figura 1.8] En la expo 67 en Montreal al interior de las redes del pabellón de Alemania el auditorio fue cubierto con un cascarón. La imagen muestra el proceso de recubrimiento de la retícula con madera. Imagen de Kleinmanns (2017)

[Figura 1.9] Vista interior del auditorio dentro del pabellón de Alemania en la expo 67 en Montreal. Imagen de Kleinmanns (2017)

A diferencia de los cascarones realizados en Essen y Montreal el Multihalle Mannheim se realizó con una retícula doble para incrementar el momento de inercia de las barras separadas, dada una magnitud sin precedentes. Durante la deformación para lograr la doble curvatura fue necesario que una de las capas de barras se desliza sobre la otra generando los arcos irregulares. Las barras se fabricaron con longitudes entre 30 y 40 m, las barras más largas fueron unidas in situ. (Burkhardt et al., 1978)

La retícula plana (Burkhardt et al., 1978) se deformó con torres-andamio [Figura 1.11] colocadas aproximadamente a cada 9 x 9 m que fueron gradualmente elevadas (originalmente se planteó usar grúas, pero fueron descartadas por la precisión necesaria para este proyecto), en la parte superior tenían una pirámide y en la punta de la pirámide una articulación que conectaba con sistema transversal en forma de H para transmitir la carga sobre una cantidad mayor de nodos en la retícula. Se ajustaron gradualmente las alturas de estas torres para que el nodo en la punta se ubicase en su coordenada tridimensional exacta. Al tener la posición final del andamiaje se observó una deflexión aproximada de 200 mm en los puntos intermedios entre torres, cálculos a mano indicaron que la desviación permisible era de ± 50 mm de la superficie de Linkwitz (superficie ideal obtenida de la simulación computacional) fue necesario ajustarlos manualmente modificando las alturas de las torres y corroborar la suavidad de la curvatura visualmente. Una vez que se ajustó la geometría final se apretaron los tornillos de los nodos, se fijaron las uniones a cortante, se colocaron los cables diagonales y se fijaron los apoyos. Para el detallado ingenieril, que implicaba geometrías de doble curvatura (e.g., los bordes con vigas de madera laminada) el despacho OAP desarrolló computacionalmente los programas para realizar el trazo. La piel polimérica (cuyo patronaje también fue realizado por el IAGB) fue clavada y vulcanizada. Después

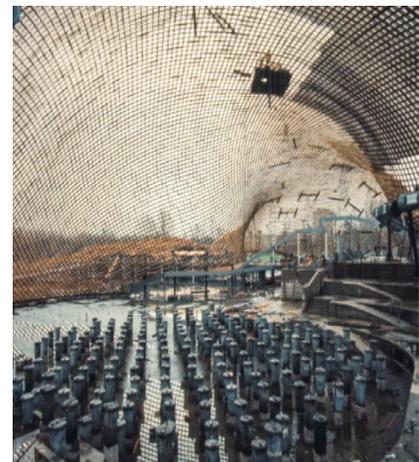


de las construcción se realizaron un gran número de pruebas de carga, resistencia y deformación. [Figura 1.10]

Décadas después de la conclusión del trabajo de investigación de Otto, el ICD (Instituto de Diseño Computacional de la Universidad de Stuttgart) abrió en 2017 su nuevo laboratorio de fabricación robótica, en la línea de colaboración académico-industrial alemana llamada industria 4.0, (Sheil & Menges, 2017) originada de la estrategia del gobierno alemán de alta tecnología para catalizar una cuarta revolución industrial, parte del trabajo de estos institutos se retoma en Flexión Activa.

1.3.2.1.2. Descripción técnica

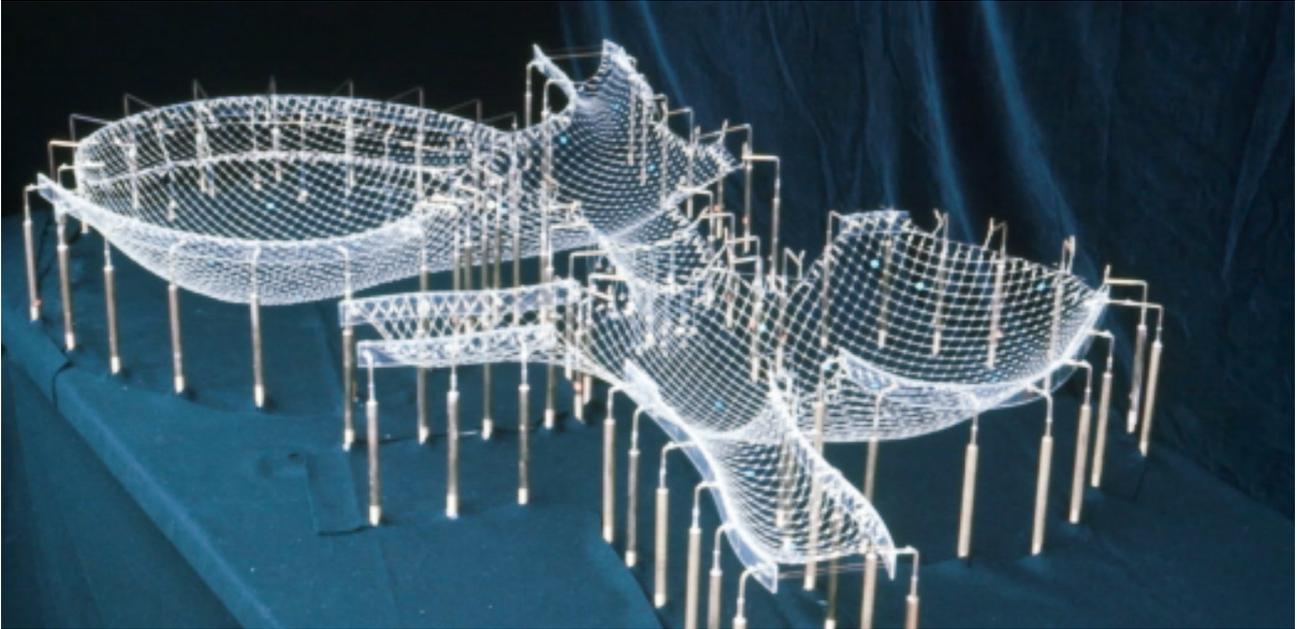
La forma curva de un cascarón (Adriaenssens et al., 2014) permite la transformación de las cargas en esfuerzos-membrana, es decir, que las fuerzas son tangentes a la superficie. Esto permite que el cascarón trabaje en mayor medida a tracción y compresión y en menor medida a flexión, lo que tiene como resultado un comportamiento mecánico mucho más eficiente dado que la distribución de fuerzas en la sección es más uniforme. El teorema Cohn-Vossen (en geometría diferencial) enuncia que no es posible deformar una superficie convexa cerrada sin modificar las longitudes en la superficie, es decir la deformación inextensional es imposible. Las cargas perpendiculares a la superficie se equilibran por el esfuerzo-



[Figura 1.10] Prueba de carga y deformación con contenedores de agua colgando de la retícula. Imagen de Kunz (2017)

[Figura 1.11] Torres-andamio y sistema de distribución de fuerzas utilizadas para elevar y deformar la retícula. Imagen de Kunz (2017)





membrana multiplicado por la curvatura. A pesar de esto, es necesario que una cascarón-membrana tenga cierta rigidez flexionante si va a tener esfuerzos a compresión para resistir los efectos del pandeo.

Los cascarones reticulares investigados Otto et al. (1973) son definidos como: Un entramado de barras y uniones rígidas curvado tridimensionalmente, donde la forma ideal se define invirtiendo la geometría de una red colgante. Así como la inversión de una catenaria genera la forma de un arco libre de momentos (flexión), la red colgante inversa genera la superficie de un cascarón con la misma propiedad. El cascarón cuya forma es encontrada mediante la inversión de una red colgante puede ser llamado también "casarón funicular". [Figura 1.14]

[Figura 1.12] Reticula en proceso de deformación. Imagen de Kunz (2017)

[Figura 1.13] Exhibición alemana federal de jardinería (Bundesgartenschau) de 1975, Mannheim. Imagen de Burkhardt et al (1978)

[Figura 1.14] Modelo de red colgante para el cascarón de Mannheim. Imagen de Kleinmanns (2017)

[Figura 1.15] Edificación concluida. Imagen de Burkhardt et al (1978)



1.3.2.1.3. Aplicación en CRGFA

El CRGF (Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa) se plantea como una estructura de superficie de doble curvatura generada por barras flexionadas elasto-plásticamente. La doble curvatura permite un comportamiento de membrana que evita deformaciones grandes en el sistema, pero es necesario generalmente tener bordes apoyados o en su defecto reforzados ya que los bordes son los que sufren los mayores esfuerzos. La generación de una retícula para aproximarse a una superficie de doble curvatura que es mecánicamente estable y óptima y constructivamente factible se explora en la siguiente sección.

El entramado de barras se dispone irregularmente sobre la superficie (a diferencia de los cascarones de Otto que tienen una retícula con módulos cuadrilaterales). Las uniones permiten el giro en los sentidos tangentes a la superficie pero evitan el movimiento articulado fuera del plano de la superficie. Los tres sentidos de barras trazadas la superficie generan los triángulos suficientes para evitar el movimiento “de tijera” de las barras. La configuración del sistema no se restringe a formas funiculares, sin embargo una forma funicular ayudará a tener un comportamiento estructural mucho más eficiente. La manera en que se define la trayectoria de las barras del cascarón se es explicada en la sección a continuación.



[Figura 1.16] Primer prototipo a escala de CRGFA realizada en el Laboratorio de Estructuras de la F.A. UNAM. Las barras son de estireno y las uniones son de alambre de acero con cuentas de vidrio. Video del proceso disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=-B90gAMeazg&ab_channel=erikmolina

1.3.2.2. Geodesia

1.3.2.2.1. Desarrollo histórico y estado del arte

El término domo geodésico (Tarnai 1995) es una invención de Buckminster Fuller patentada en 1951 definido como “una estructura generalmente esférica donde los elementos interconectados forman un patrón geodésico de arcos circulares que se intersectan para formar una retícula en tres sentidos” la retícula se genera mediante la triangulación de la superficie de la esfera donde las líneas de subdivisión son grandes círculos, eso significa que las curvas geodésicas sobre la esfera, y la configuración básica son un icosaedro esférico. Existen casos de estructuras similares desde las culturas del neolítico, sin embargo la primera estructura moderna triangulada y basada en el icosaedro fue construida, diseñada por Walter Bauersfeld en 1922 en Jena, Alemania.



En la naturaleza viva existe una gran variedad esferoides con unidades estructurales iguales o casi iguales distribuidas con cierta uniformidad sobre la superficie. Radiolarios Phaeodaria, phytoplankton, e.g. Triceratium, algas Volvox, y virus. En 1960 Caspar y Klug formularon la teoría de quasi-equivalencia para representar la distribución de moléculas en la cápside del virus TYMV, inspirados en la esfera tensegrítica de 270 barras de Fuller, más adelante explicando la estructura de los virus TSV-TBSV y hepatitis B. También Harry Kroto en 1960

[Figura 1.17] En 1964 (Fuller 1981) la Agencia de Información Estadounidense le solicitó a Fuller el diseño del pabellón para la Expo67 en Montreal, Canadá después del éxito del pabellón que diseñó para la misma exposición en Moscú de 1959. Imagen de Sampaio (2015).

nombró a la familia de moléculas esféricas del carbono Fullerenos incluyendo al C60 Buckminsterfullereno. (Tarnai 1995)

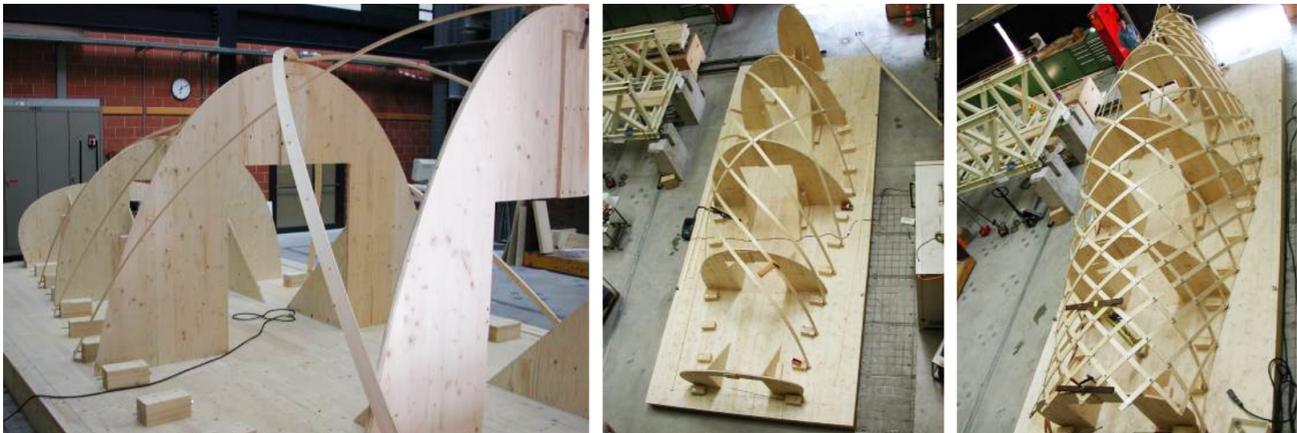
Klaus Linkwitz (1991) Director del IAGB expresó que: “El potencial de la transmisión de conocimiento de la geodesia a la elastomecánica de estructuras es sorprendente. Se ha abierto un campo completo de aplicaciones y aprendizajes reveladores en ambas teorías. Desde 1968, (desde hace más de 20 años) esta aproximación ha llevado a desarrollos sorprendentes a partir de los programas de investigación en la Universidad de Stuttgart SFB 64 y 239.”

El diseño de patrones de curvas geodésicas en superficies de forma libre (Pottmann et al., 2010) se ha convertido en un área dentro de la geometría arquitectónica muy relevante, en sus aplicaciones para la panelización con materiales flexibles de una superficie, o el diseño de estructuras de cascarones. Un ejemplo en la EPF Lausanne son los cascarones de madera con curvas geodésicas que desarrollaron como proyecto de investigación. Las propiedades de las geodésicas hacen a los patrones de estas curvas la entidad geométrica básica para resolver la panelización de una superficie de forma libre.

1.3.2.2.Descripción técnica

La curvatura “k” de una línea sobre una superficie de doble curvatura (Adriaenssens et. al., 2014) puede ser dividida en dos componentes: curvatura geodésica y curvatura normal ($K=K_{geodesic} + K_{normal}$). La curvatura geodésica es la curvatura dentro del plano local tangente a la superficie y la curvatura normal es perpendicular a la superficie. Una línea geodésica es una línea en la superficie, que tiene cero curvatura geodésica. En superficies curvas (Polthier & Schumiers, 1998) la geodésica es la línea más “recta”, equivale al concepto de líneas rectas euclidianas. La curva geodésica (Pottmann et al., 2010) son la forma de equilibrio estático de una barra elástica constreñida a una superficie. Constructivamente es mucho más fácil la manufactura de un elemento estructural lineal curvo si se puede generar su geometría flexionando y torciendo con respecto a la dimensión menor de la sección.

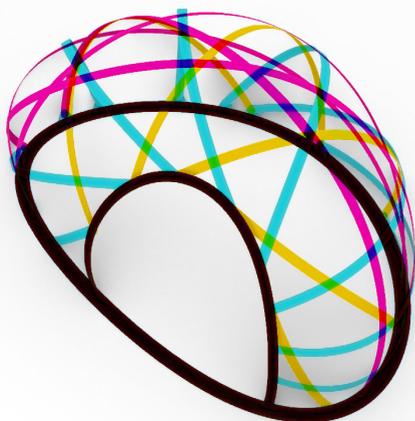
[Figura 1.18] Para la optimización de cascarones reticulares de madera con respecto al esfuerzo flexionante de barras curvadas se desarrolló el software GEOS en el Instituto Tecnológico Federal Suizo en Lausanne entre 2002 y 2004. En verano de 2005 se construyó un prototipo que demostró las asunciones en las que estuvo basado el programa. Imagen de Pirazzi & Weinand (2006).



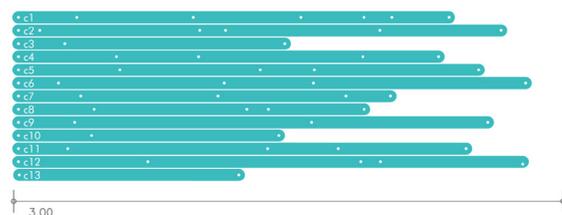
1.3.2.2.3. Aplicación en CRGFA

La trayectoria de las barras en el CRGFA se genera mediante el trazo de líneas geodésicas, lo que permite su fabricación con barras rectas sin flexión lateral en el plano local tangente a la superficie. El espesor de las barras (dimensión de la sección normal a la superficie) requiere ser proporcionalmente menor al ancho para permitir la deformación elástica. Un ancho mayor permite un esfuerzo de membrana eficiente, lo que con un dimensionamiento adecuado puede alcanzar una rigidez alta. El trazo con curvas geodésicas también facilita la panelización de una piel, por ejemplo de membrana traccionada (lona u otros materiales textiles).

El trazo geodésico es utilizado para generar la geometría de las barras, i.e. la trayectoria que seguirán a través de la superficie. Este método garantiza que en su estado plano las barras sean perfectamente rectas, los perfiles rectos son en la actualidad lo más común en la industria. Es necesario trazar barras en tres sentidos que se intersectan entre ellas (a diferencia del cascarón de Pirazzi & Weinand (2006) que tiene sólo dos sentidos de barras), los tres sentidos garantizan la generación de triángulos que imposibilitan el movimiento de tijera entre las barras. Durante el trazo también se debe buscar que las intersecciones no generen triángulos menores al ancho de la sección, ya que las uniones se dificultan. Las uniones se realizan con barrenos a distancias dadas por las intersecciones en la forma tridimensional. En el CRGFA hay elementos lineales que pueden no ser definidos por un trazo geodésico, e.g., en bordes no apoyados, tales elementos en su estado plano no serán rectos, y por lo tanto será necesario un proceso de fabricación más sofisticado como corte o rolado CNC. La manera en que las barras se deforman para generar la doble curvatura son vistas en la sección a continuación.



[Figura 1.19] Modelo 3d de CRGFA, las barras en un sentido se representan con el mismo color (cyan), las imágenes muestran las barras deformadas tridimensionalmente y las barras rectas antes de la deformación.



1.3.2.3. Flexión activa

1.3.2.3.1. Desarrollo histórico y estado del arte

De acuerdo a la Enciclopedia de Arquitectura Vernácula, citada por Lienhard (2014), el uso de ramas flexibles es probablemente antecesora de las técnicas de cestería, en las viviendas más antiguas la técnica constructiva de tejido parece íntimamente conectada con el mecanismo estático de los habitáculos con forma de domo. [Figura 1.20, 1.21, 1.22, 1.23] La estabilidad estructural es garantizada por la presencia de un entramado cruzado que une elásticamente los arcos pretensionados de un sistema resistente. Un indicador de su potencial de ligereza y uso económico del material se evidencia al considerar que tales estructuras se encontraban predominantemente donde las maderas duras eran escasas o no existía la tecnología para el procesamiento de grandes piezas de madera.



[Figura 1.20] Viviendas Mudhif, por el pueblo Ma'dan en los pantanos del sur de Iraq. Imagen de Sabera (2016).

[Figura 1.21] Mudhif en construcción en los pantanos del sur de Iraq construida desde hace aproximadamente 5000 años por el pueblo Madan. Imagen citada por Lienhard (2014).

Durante el s.XIX Vladimir Shukhov y Antoni Gaudí incursionaron en estructuras ligeras, interés que despertó durante el s.XX con personajes como Eduardo Torroja, Heinz Isler, Buckminster Fuller, Frei Otto y Félix Candela. Paralelo al desarrollo de estructuras ligeras, los Polímeros Reforzados con Fibras (FRPs) fueron introducidos en la década de 1950, con prototipos arquitectónicos como la Casa del Futuro por la compañía química Monsanto en 1954 y la casa "futuro" por Suuronen en 1968. (Lienhard, 2014)



[Figura 1.22] Viviendas Mudhif, por el pueblo Ma'dan en los pantanos del sur de Iraq. Imagen de Sabera (2016).

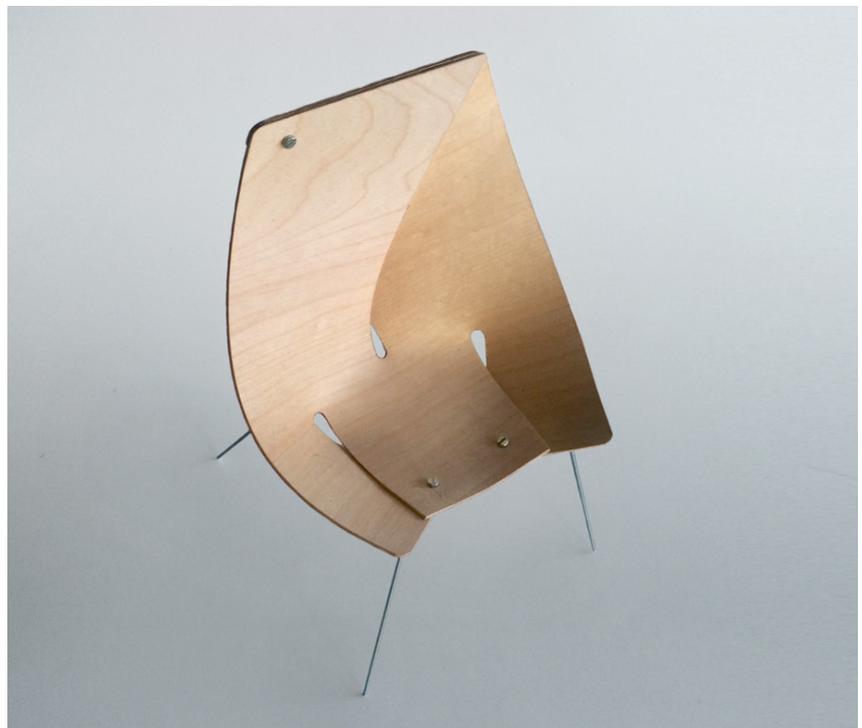


[Figura 1.23] Mudhif en construcción en los pantanos del sur de Iraq construida desde hace aproximadamente 5000 años por el pueblo Madan. Imagen citada por Lienhard (2014).



[Figura 1.24] Auditorio efímero para la FADfest 2017 para evento de 4 días con una capacidad de 900 personas. Cascarón reticular elástico de perfiles tubulares de Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP) unidos con articulaciones de acero. Imagen de CODA (2015).

[Figura 1.25] Silla Graz realizada por la agencia de diseño CODA. La forma se corta de un panel de madera laminada plano y se deforma elásticamente para obtener la geometría final y estabilidad. Imagen de CODA (2015).





Flexión Activa fue establecido (Lienhard & Gengnagel, 2018) como grupo de estudio dentro de la Asociación Internacional de Estructuras Espaciales (IASS) dentro del grupo 15 Morfología Estructural en la conferencia de Seúl 2012 para establecer la terminología y referencias comunes. Desde la fundación del grupo de estudio la comunidad de investigadores y practicantes ha realizado varios prototipos de investigación y estructuras comerciales. Con los prototipos se ha demostrado la eficiencia de los cascarones reticulares elásticos para cubrir claros amplios. Sigue abierto aún el reto de desarrollar pieles o recubrimientos flexo-elásticos estructuralmente activos.

[Figura 1.26, 1.27] El pabellón de bambú ZCB, octubre del 2015, en bahía Kooloon, Hong Kong (usado durante 8 meses y reciclado posteriormente), es un cascarón reticular de flexión activa de con un claro de 30 m, fabricado manualmente y cubierto de una membrana translúcida de GFRP. El proyecto plantea la incorporación de técnicas tradicionales y el uso de herramientas computacionales para el diseño y la construcción. Trata extensamente el problema de la indeterminación de materiales no estandarizados y aproximaciones que balancean el riesgo con base en un modelo estadístico que asume la ambigüedad en contraposición a un diseño idealizado. (Crolla, 2017)



El campo de la flexión activa (Lienhard & Gengnagel, 2018) ha incrementado drásticamente en los últimos años. En 2012 era escaso el software con el que era posible simularla, pero a la fecha la capacidad computacional ha aumentado considerablemente. En la actualidad diferentes sistemas computacionales integrados, por ejemplo: los modelos de partículas y resortes, solucionadores de relajación dinámica, (siendo uno de los más prominentes Kangaroo 2 de Daniel Piker para simulaciones calibradas) o el software para elemento finito SOFiSTIK y sus nuevas funciones para elementos pre-deformados. La flexión activa (Nicholas & Tamke, 2013) implica un alto nivel de integración entre el pensamiento ingenieril y el proceso de diseño. Para trabajar dentro de este espacio es indispensable una síntesis del diseño, la especificación técnica y la simulación del comportamiento del material desafiando los métodos existentes en la práctica arquitectónica.

[Figura 1.28, 1.29] Prototipo realizado en Stuttgart (Bechert et al., 2016) por el Instituto de Diseño Computacional (ICD) y el Instituto de Estructuras Para la Edificación y Diseño Estructural (ITKE) en colaboración con el Departamento de Geociencia de la Universidad de Tübingen. Para el pabellón del 2015 se estudió el esqueleto de equinoideos, sus principios estructurales y constructivos se transfirieron a la edificación de un cascarón segmentado. Se identificó: (1) un esqueleto de doble capa, (2) organización jerárquica del material y diferenciación de los osículos calcáreos, (3) la unión de segmentos mediante conexiones denticuladas. Para la panelización los segmentos que se añaden y crecen sobre una superficie preestablecida se lograron mediante un algoritmo de crecimiento en aglomeración circular. Fueron utilizados 151 segmentos de madera laminada entre 3 y 6 mm de espesor. Con un peso total de 780 kg y cubriendo una superficie de 85 m², con un claro de 9.3 m. Imágenes del Instituto de Diseño Computacional de la Universidad de Stuttgart (Institute for Computational Design, 2016)



1.3.2.3.2. Descripción técnica

El término flexión-activa (bending-active o biegeaktiver) es introducido por Lienhard (2014) para describir estructuras compuestas de elementos lineales o superficiales que adquieren su geometría mediante deformación elástica. En las arquitecturas vernáculas de diferentes culturas se encuentran métodos constructivos que utilizan la elasticidad de los componentes como un modo de dar



[Figura 1.30] El prototipo de investigación Berkeley Weave está basado en una superficie de Enneper modificada, se eligió tal forma por su geometría anticlástica y su relativamente alta curvatura local. La superficie se discretizó en un mallado de cuadriláteros no planares, posteriormente se transformó en un patrón tejido de cuatro capas con tiras y orificios. Cada cuadrilátero se convirtió en una intersección de dos tiras con 90° una de otra respectivamente. Las intersecciones se planarizaron con un algoritmo de optimización. Las terminaciones de los segmentos de tiras quedaron prensadas entre las tiras opuestas. Se empleó madera laminada de 3.0 mm de espesor. La estructura emplea 196 elementos únicos. Imagen de La Magna, Schleicher & Knippers (2016).



[Figura 1.31] Bend9 (forma de arco) es un arco de múltiples capas con un claro de 5.2 m fue construido para mostrar la factibilidad técnica del uso de placas flexionadas para estructuras mayores. Muestra una teselación hexagonal y explora la posibilidad de incrementar significativamente la rigidez al conectar diferentes capas. Imagen de La Magna, Schleicher & Knippers (2016).

[Figura 1.32] Pabellón experimental de la Universidad de Calgary 2015, (Lienhard & Gengnagel, 2018)

[Figura 1.33] Undykates 2016. (Lienhard & Gengnagel, 2018)

forma y lograr la estabilidad de una edificación, sin embargo en las estructuras del siglo XX hay muy pocos ejemplos siendo los más destacados algunos cascarones reticulares. A nivel estructural son geometrías curvas con esfuerzos residuales que influyen en su capacidad de carga, entender la interacción entre fuerza y forma es fundamental para este género de estructuras. Las ventajas que tienen son: a) un bajo volumen de las piezas pre-ensambladas, b) facilidad de ensamblaje, c) adaptabilidad y resiliencia por su alta capacidad de deformación reversible. Lienhard coloca a esta categoría de estructuras con respecto a la clasificación de Heino Engel como una categoría menor dentro de las estructuras de sección activa.

La capacidad de carga de las estructuras de flexión activa depende ampliamente en la topología y geometría. La forma estable o la forma óptima deben ser encontradas, pues no es posible imponer una forma arbitraria ya que los componentes deformados elásticamente buscarán su estado de equilibrio mecánico. Tal comportamiento depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. (Lienhard & Gengnagel, 2018)

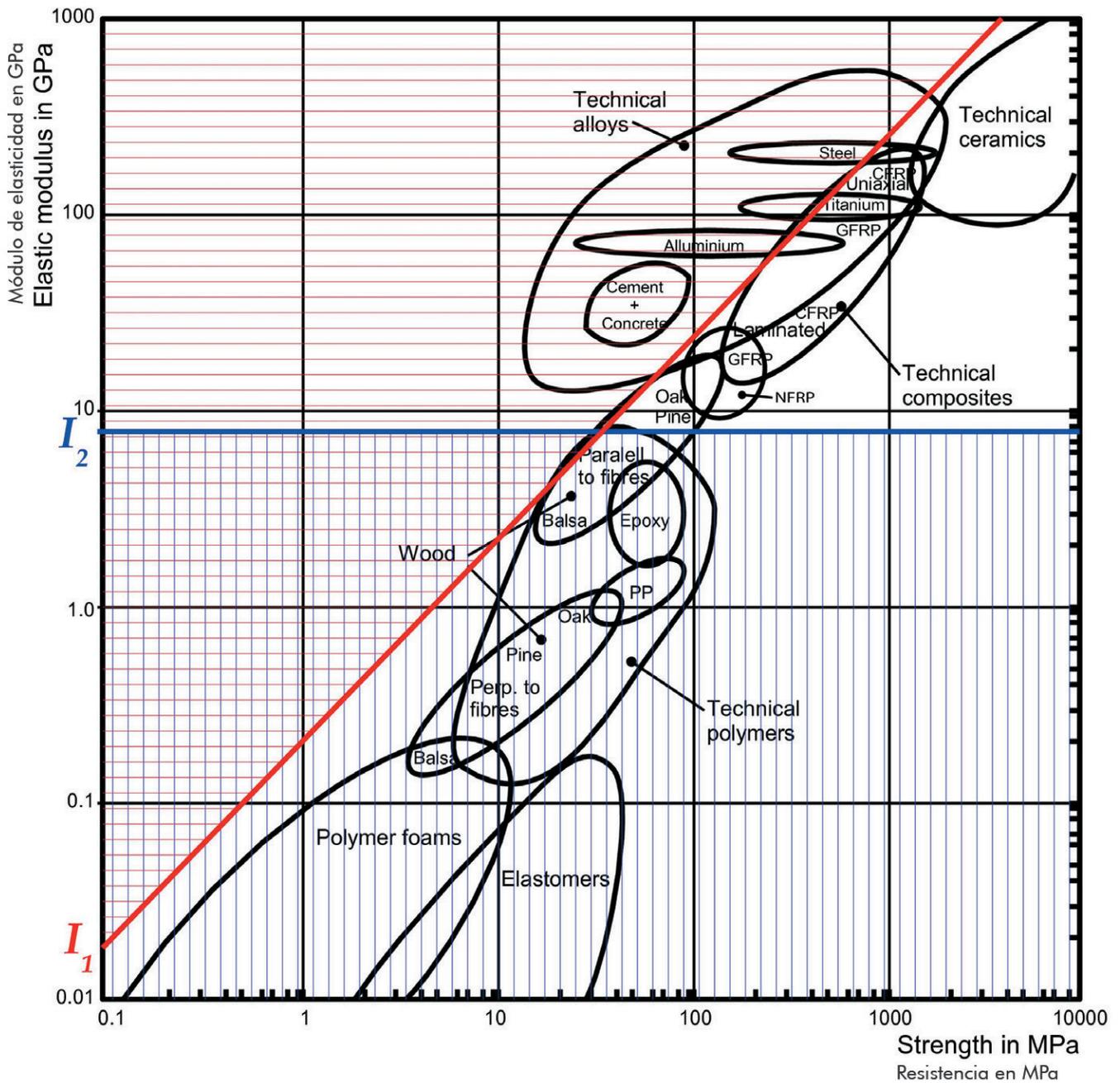


Se puede plantear una distinción entre cascarones de superficie, cascarones de placas [Figura 1.25, 1.28, 1.30, 1.31, 1.32, 1.33] y cascarones reticulares [Figura 1.24, 1.26, 1.34, 1.35, 1.36]. La Magna, Schleicher & Knippers (2016) plantean que las placas son inicialmente planas y los cascarones presentan una curvatura original en su estado libre de esfuerzos. (introduciendo una diferencia terminológica con Otto y Lienhard) El comportamiento estructural de ambas estructuras es definido por dos estados de deformación principales: esfuerzo membrana y flexión. La flexión pura tiene deformación inextensible, dado que la superficie-eje neutro es libre de extensión o esfuerzo normal (tracción o compresión. En términos matemáticos las placas sólo pueden tener deformación inextensible si adoptan formas cónicas o cilíndricas, es decir, superficies desarrollables. En aplicaciones estructurales la deformación membrana es preferida ya que la sección se utiliza completamente y la capacidad de carga del cascarón es mejor. Por otro lado la deformación inextensible puede ser aprovechada para el proceso de formación de la estructura. Además de la flexión, se pueden emplear mecanismos de torsión para inducir la forma. Suponiendo un comportamiento elástico perfecto y secciones esbeltas, la curvatura y el ángulo torsionante límite pueden establecerse con los modelos Euler-Bernoulli (flexión) o Saint-Venant (torsión).

[Figura 1.34] Cubierta provisional para las obras de restauración en Nuestra señora de Créteil, Francia: "Cathédrale éphémère de Créteil" 2013, (Lienhard & Gengnagel, 2018)

[Figura 1.35] Instalación en el Workshop CCA 2015, (Lienhard & Gengnagel, 2018)

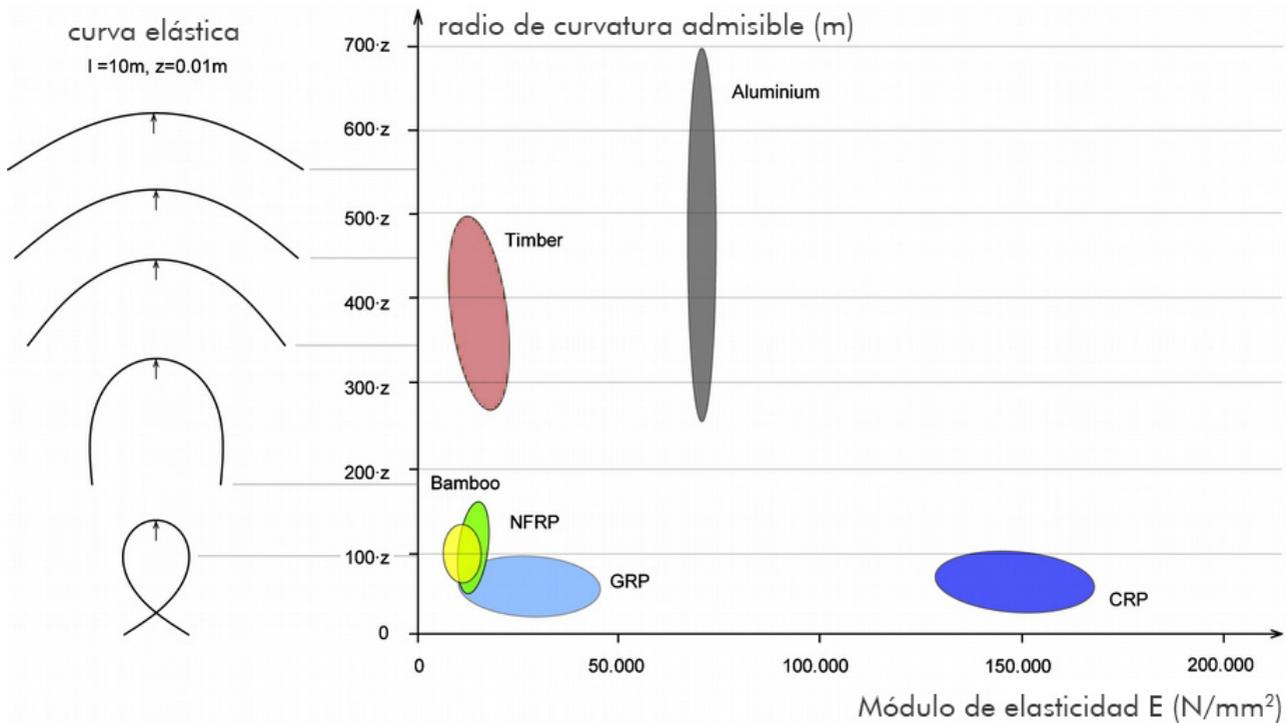
[Figura 1.36] Pabellón experimental "Inside out" de la universidad de Múnich, 2017. (Lienhard & Gengnagel, 2018)



[Figura 1.37] gráfica logarítmica (Kotelnikova-Weiler et al, 2013) de límite elástico y módulo de Young. Los materiales con un límite elástico mayor al del roble o el abies (maderas elegidas para los cascarones reticulares existentes) se ubican debajo de la línea oblicua. Los materiales con módulos mayores están ubicados por encima de la línea horizontal. Los materiales delimitados por el polígono superior derecho (titanio, GFRP, CFRP, NFRP pultruidos, aceros de alto grado, y cerámicas técnicas) tendrán mejores propiedades mecánicas que la madera. Otros materiales más tradicionales ofrecen una deformabilidad elástica menor, lo que justifica el uso de la madera, sin embargo los nuevos materiales ofrecen propiedades con numerosas ventajas. Imagen de Kotelnikova-Weiler et al, (2013)

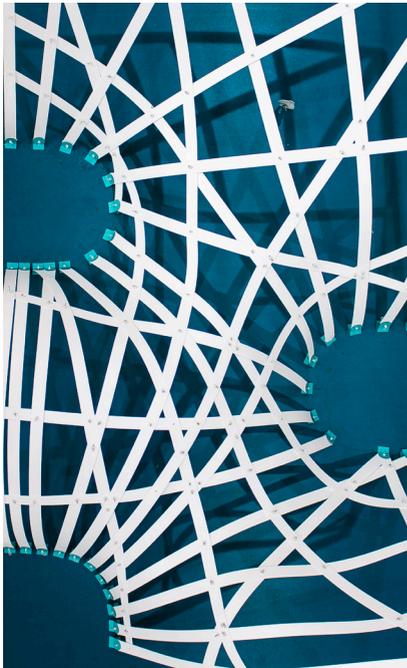
Históricamente los cascarones reticulares elásticos (Kotelnikova-Weiler et al, 2013) han sido hechos de madera de pino y bambú. En el laboratorio Navier en Francia (2003-2013) se ha investigado sistemáticamente los materiales para estructuras de flexión activa. Utilizando el método de Ashby se identificaron materiales con excelentes cualidades: polímeros reforzados con fibra de vidrio y fibras naturales (GFRPs y NFRPs). Con este método se definen los indicadores que caracterizan los requerimientos del objeto a diseñar, que se utilizan para mapear o graficar los materiales.

[Figura 1.38] Módulo de elasticidad y radio máximo de flexión para diferentes materiales. Los materiales apropiados para la flexión activa deben tener una baja proporción entre módulo de elasticidad y resistencia a la flexión para permitir radios menores. Los FRPs y maderas son los materiales más aptos. Imagen de Gengnagel, Alperman & Lafuente (2014)



			Bending strength (0°) [N/mm ²]	Modulus of elasticity [N/mm ²]	allow. Radius of curvature [m]	Density [kg/m ³]	Strength to weight ratio [N m/g]
Madera	Timber	Structural and glued laminated timber ¹	24 ... 60	11.600 ... 17.000	283 ... 483*z	380 ... 700	63 ... 86
Bambú	Bamboo	Phyllostachys pubescens (1-5 years old) ²	119 ... 185	8.680 ... 13.410	67 ... 73*z	330 ... 660	249 ... 362
		Laminated bamboo ³	113 ... 125	10.899 ... 12.145	87 ... 107*z	600	189 ... 208
Polímero reforzado con fibra natural	NFRP	Natural fibres: flax, hemp, wool ^{4,5} Matrix: PP, Pes, PUR, Vinylester ^{4,5}	101 ... 180	11.500 ... 13.000	64 ... 90*z	800 ... 1.221	126 ... 147
Polímero reforzado con fibra de vidrio	GRP	Glass fibres / Vinylester ^{6,7,8}	224 ... 690	12.500 ... 41.000	46 ... 63*z	1.800 ... 2.100	124 ... 329
Polímero reforzado con fibra de carbono	CRP	Carbon fibres / Vinyl or Epoxy ^{8,9,10}	2.070 ... 2.800	131.000 ... 165.000	59 ... 64*z	1.600	1.294 ... 1.750
Aluminio	Aluminium	EN AW-5754 / 7020 ¹¹	Yield strength [N/mm ²] 100 ... 280	Modulus of elasticity [N/mm ²] 70.000	allow. Radius of curvature [m] 250 ... 700*z	Density [kg/m ³] 27.000	Strength to weight ratio [N m/g] 4 ... 10

Source: ¹ Eurocode 5; ² Xiaobo Li, 2004; ³ Shigeru Ban, 2006; ⁴ Van de Velde et al., 2001; ⁵ Xi Peng et al., 2011; ⁶ Strongwell (2002); ⁷ Creative Pultrusions (2000); ⁸ Asland (Hughes Brothers); ⁹ Leadline (Mitsubishi); ¹⁰ Sika (2000); ¹¹ Eurocode 9

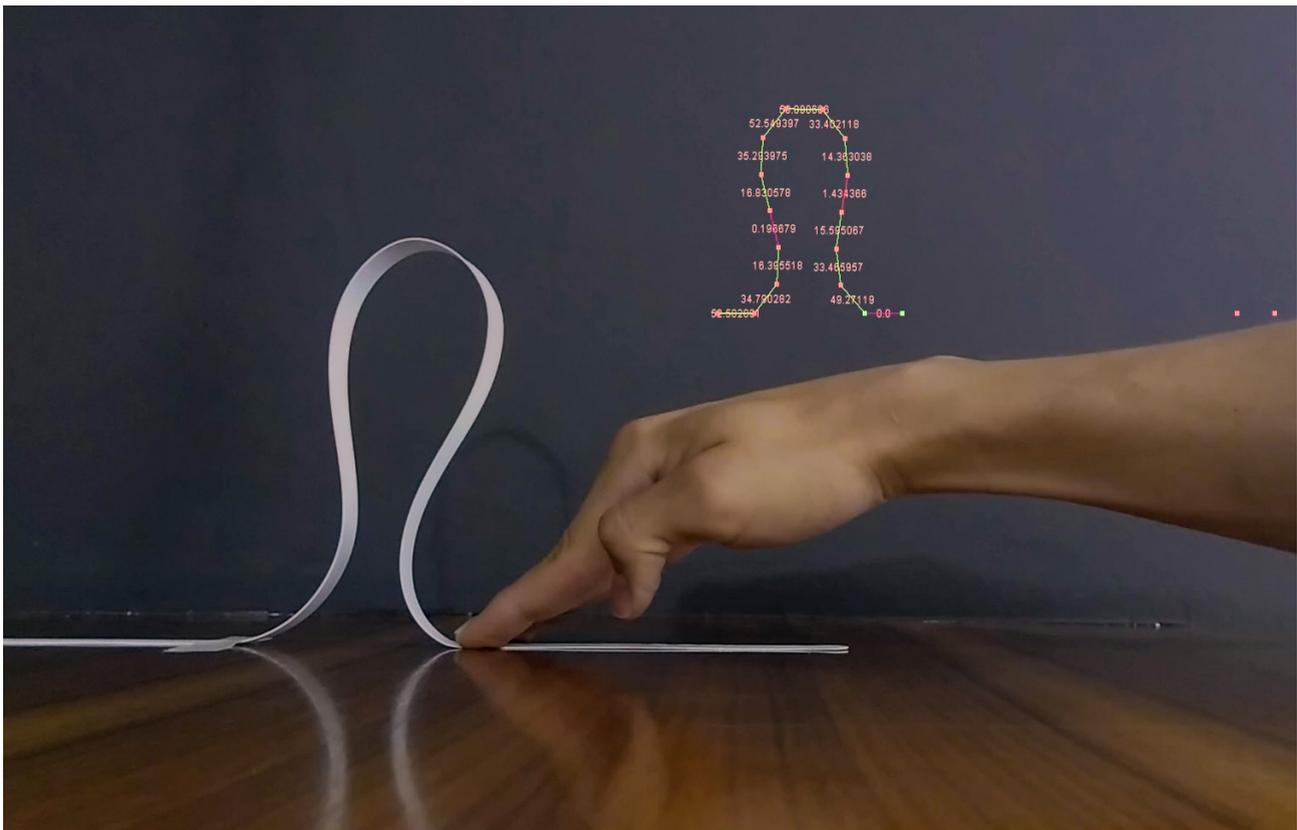


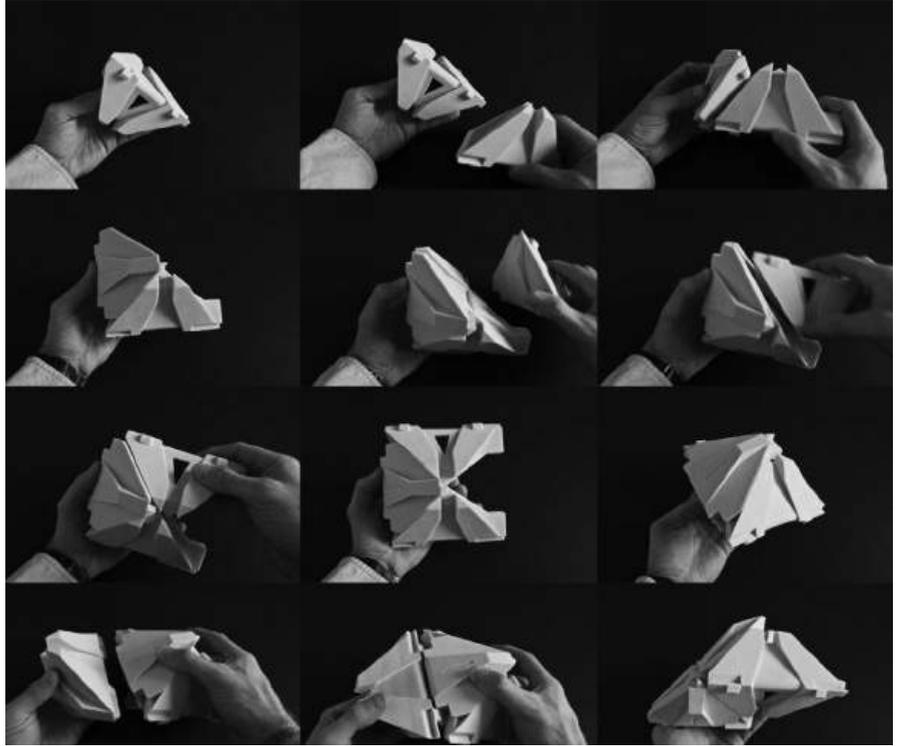
[Figura 1.38] Las barras en el CRGFA se entretejen y flexionan para obtener la forma de la superficie de doble curvatura.

1.3.2.3.3. Aplicación en CRGFA

La superficie del CRGFA debe ser diseñada considerando los radios mínimos de deformación elástica de la sección y material a utilizar. Esto se puede lograr revisando durante el diseño la curvatura gaussiana de la superficie, o mediante una simulación (form finding) para determinar la forma que incluya las propiedades de deformación elástica de los materiales y secciones. En las barras hay una gran diferencia entre longitud, ancho y espesor, ya que la deformación elástica flexionante para curvar las barras requiere de espesores menores (cm o mm). Una proporción aproximada entre el ancho y el espesor sería entre 1/10 y 1/50. En los prototipos realizados se utilizó estireno, acero templado y acero estructural, por su disponibilidad en los casos específicos. Es importante señalar que el acero con las curvaturas del cascarón realizado entró en el rango de comportamiento plástico (deformación permanente) cosa que no afectó la estabilidad, pero sí presenta una desviación entre la simulación (que asumía un comportamiento elástico lineal) y el comportamiento real. El comportamiento plástico del material queda fuera de los alcances de esta investigación. Por último en la sección siguiente se explicará cómo se logra una exactitud de la forma exclusivamente a través de los elementos constructivos.

[Figura 1.39] El fenómeno de deformación por flexión se puede simular computacionalmente. En la imagen se muestra la comparación entre la simulación y una prueba física antes de la realización del primer prototipo a escala.





1.3.2.4. Ensamblaje auto-guiado

1.3.2.4.1. Desarrollo histórico y estado del arte

John Von Neumann comenzó en la década de 1940 la búsqueda por reproducir la capacidad de sistemas biológicos (ADN/ARN) para auto-ensamblarse. Penrose y Von Neumann demostraron que las cualidades esenciales de la reproducción natural y el auto-ensamblaje celular eran posibles en sistemas mecánicos reales. La idea de poder programar en el mundo físico condujo a un nuevo modelo de cómputo llamado cómputo espacial y la implementación de un lenguaje de programación llamado Autómata Lógica Asincrónica Reconfigurable (RALA). La lógica digital puede estar compuesta exclusivamente de entidades geométricas físicas, que tengan transformaciones en relación directa con los componentes colocados anteriormente. Cuando las piezas son colocadas sucesiva y exitosamente se genera una secuencia lógica. Las piezas reciben inputs, sufren transformaciones y generan outputs. (Tibbits, 2007)

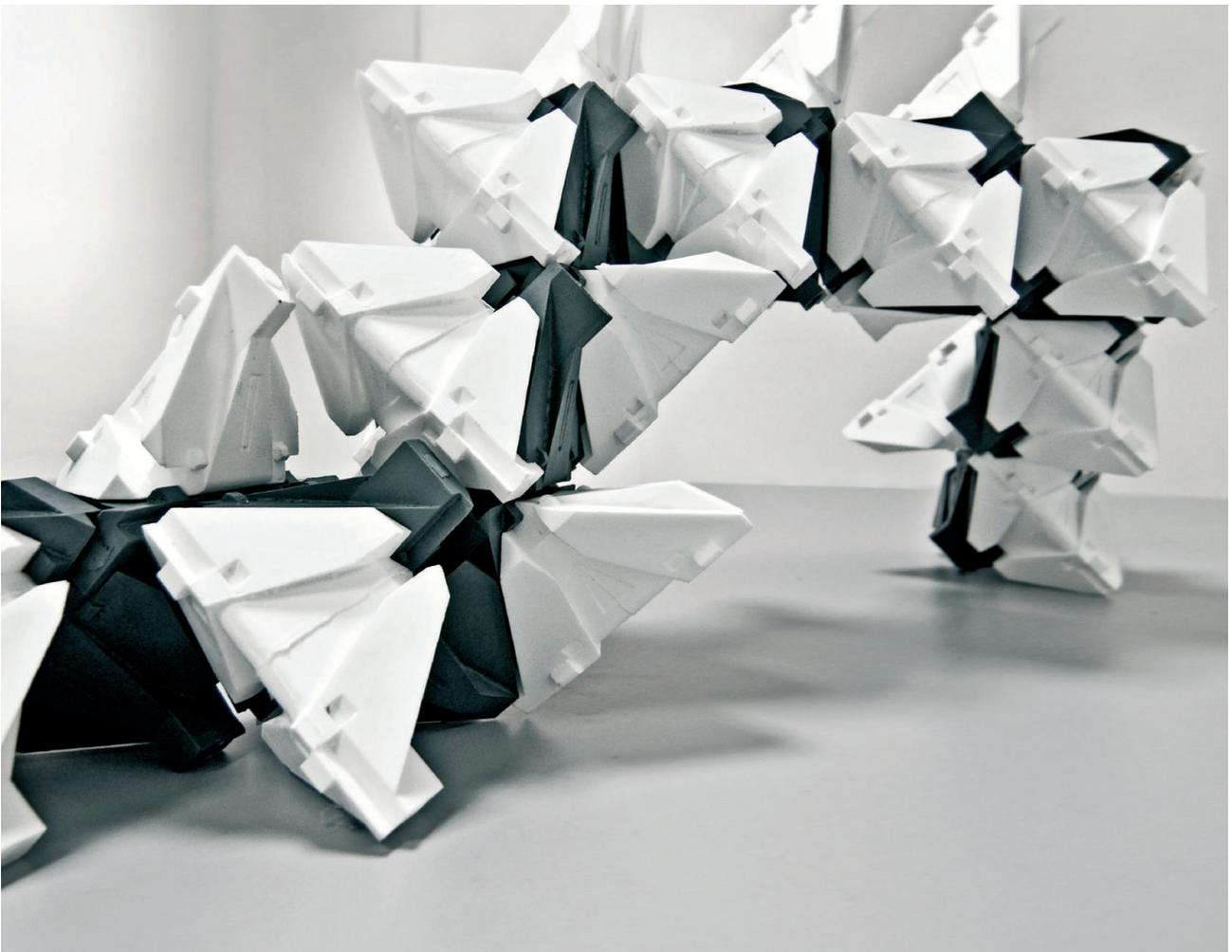
Logic Matter es un sistema de módulos físicos, desarrollado por Skylar Tibbits en la primera década del s.XXI en el Centro de Bits y Átomos del MIT, que pueden combinarse para computar localmente la ubicación de las piezas subsecuentes con base en los movimientos previos. El sistema tiene la información local contenida en la geometría de los módulos, cada uno funcionando como un puente NAND con dos elementos de input (dos módulos conectados previamente). (Tibbits, 2007)

[Figura 1.40] Cuatro módulos RALA demostrando la programabilidad de la configuración base. Para una descripción detallada del proceso lógico-material ver la tesis de Tibbits (2007).

1.3.2.4.2.Descripción técnica

El problema que surge del ensamblaje de geometrías complejas (Tibbits, 2007) es que implican tolerancias de material, propagación de error, dificultad en las secuencias de construcción y el incremento en la complejidad de la información necesaria para construir. Muchos de estos problemas se relacionan con el procesamiento y transferencia de información entre los materiales o entre quien ensambla (máquina o humano) y el material. Algunas técnicas se han desarrollado para la resolución de estos problemas, e.g., máquinas de control numérico computarizado (CNC), brazos robóticos, impresoras 3D y otros, no obstante Tibbits afirma que estas máquinas evaden las cuestiones del ensamblaje en vez de resolverlas. Para romper los límites de la complejidad en la construcción es necesario embeber información discreta de ensamblaje en el material para lograr un ensamblado que se guía a sí mismo. Al expandir la noción de los materiales digitales encontramos la oportunidad de embeber información en el material para obtener configuraciones a partir de componentes más simples.

[Figura 1.41] Prototipo funcional de 60 unidades mostrando la programabilidad tridimensional. Los tetraedros blancos son redundantes com entrada (input) y los tetraedros grises NAND son los valores de salida (output). Para una descripción detallada del proceso lógico-material ver la tesis de Tibbits (2007).





[Figura 1.42] Piezas para el prototipo 1:1 del CRGFA "Crisálida" antes de su ensamblaje. Las barras (extramo izquierdo) tienen forma de solera barrenada, la información inscrita en ellas es la longitud total y la longitud entre barrenos. Cada barra tiene una nomenclatura que indica su posición, sin embargo la geometría emerge de la interacción entre componentes.

Los elementos únicos son cada vez más comunes en la construcción, lo que implica un incremento de horas de trabajo (humano o de la máquina). La información necesaria para construir geometrías complejas requieren decisiones locales geométricas. Cada pieza debe ser asignada con una nomenclatura, indicando la orientación/posición tridimensional. En cada paso quien ensambla debe ser capaz de saber qué pieza sigue y ser capaz de encontrarla entre todas las demás. ¿Cómo se puede integrar las ventajas de la robótica reconfigurable sin el uso de dispositivos electromecánicos? Tibbits plantea que mediante la creación componentes materiales que contengan la información programable en características geométricas. Existen secuencias de ensamblaje de ruta única (topología de cadena) o con estructuras de matriz, donde los nodos necesitan conectarse con múltiples vecinos y las cargas son distribuidas en múltiples direcciones. En las rutas ramificadas existe la posibilidad de describir configuraciones geométricas más grandes con mayor velocidad y eficiencia. Por ejemplo, si quisiéramos construir una superficie sería más fácil tejer un entramado de dos sentidos (u, v) opuestos. La topología de cadena es más sencilla, pero menos eficiente que la topología de matriz. (Tibbits, 2007)

1.3.2.4.3. Aplicación en CRGFA

En el CRGFA se utilizan estrategias de ensamblaje auto-guiado para la generación de geometría mediante cómputo físico auxiliado por trabajo humano. Los componentes son las barras, cuyas características que varían son las distancias entre barrenos (uniones) [Figura 1.42]. El input es la unión de la barra con respecto al cascarón, el proceso es la transformación elastomecánica que sufre por estas uniones y el output es la ubicación de los nodos que aún no están unidos. Esta ubicación de nodos indica dónde se ensamblarán los componentes subsecuentes. La ruta de ensamblaje es ramificada, es decir los componentes se conectan entre ellos en red. La secuencia termina cuando se conecta la última pieza, y es al mismo tiempo que la geometría final y estabilidad del sistema se logran. El CRGFA no requiere de dispositivos para asegurar la exactitud de la forma, la deformación elástica de las barras y las uniones son suficientes para lograr la geometría de la superficie que se busca aproximar. Esto es posible gracias a que la información necesaria para la materialización está embebida en los componentes constructivos. A diferencia del trabajo de Tibbits, los componentes no se ensamblan sólo con la aplicación de energía, tampoco se convierte la información a valores discretos y los componentes no son reprogramables. La información se plasma en el componente constructivo en forma de distancias (continuas en contraposición a discretas) entre barrenos y en algunos casos también en la geometría de los componentes lineales no geodésicos. Con un tipo de componente sencillo, y las variaciones de las dimensiones longitudinales en los barrenos se transmite la información suficiente para la generación de un entramado de barras que se aproximan a una superficie de doble curvatura. Se elimina entonces la necesidad de utilizar dispositivos configuradores (cimbras, moldes, escantillones, escáner o dispositivos robóticos) [Figura 1.43] que tienden a ser cada vez más costosos, siendo esto una gran ventaja del uso de este sistema constructivo.



[Figura 1.43] Prototipo de CRGFA "Crisálida" en proceso de ensamblaje. A medida que las barras se atornillan entre ellas, se van flexionando para adquirir su forma final.



1.4. La génesis de lo técnico

conclusiones de la introducción y el marco teórico

En este marco teórico fueron identificadas cuatro herramientas conceptuales (crítica de la ideología positivista, ontología de la tecnocultura y la tecnosociedad, construcción social de la tecnología y dimensión política de los sociotécnico) y cuatro principios técnicos (cascarón reticular, geodesia, flexión activa, y autoensamblaje). Las primeras nos permitirán trascender las barreras disciplinares del pensamiento técnico al explicar fenómenos como la morfogénesis, la consolidación y concreción del sistema técnico, la evolución tecnológica y sus aspectos cualitativos. Las segundas ayudarán a sistematizar analíticamente una explicación en términos técnicos del caso de estudio.

El pensamiento positivista excluye de la práctica aquellas técnicas que no parten de una institucionalidad y descripción desde la ciencia natural, por ejemplo, arquitecturas vernáculas, ancestrales, y de autoconstrucción, centralizando las prácticas técnicas hegemónicas consolidadas en el s.XX, por ejemplo, los métodos de análisis y diseño estructural estandarizados para la construcción con acero y concreto. Como manifestación y reproducción de la ideología positivista surgen modelos estéticos (o “estilos arquitectónicos”) como el modernismo, el racionalismo, el funcionalismo, el internacionalismo, y el brutalismo, entre otros.

Posteriormente la incorporación de la tecnociencia computacional se manifiesta en nuevas prácticas y valores estéticos presentes en el high-tech, el metabolismo, las estructuras espaciales, el deconstructivismo y el parametricismo, donde hay una nueva maduración de los métodos consolidados en la modernidad. La incorporación del cómputo no es una ruptura paradigmática, sino la continuación de un logos tecnocrático. El cómputo al automatizar procesos lógico matemáticos posibilita el procesamiento de cantidades mayores de información, sin embargo su fundamento teórico son las ciencias formales. Aunque la ciencia física tenga saltos paradigmáticos (por ejemplo: la relatividad general o la física cuántica) la ingeniería estructural sigue en su mayor parte fundamentada en la mecánica clásica y el cálculo. La flexión activa como área de investigación revela aspectos contradictorios en la disciplina técnica de la edificación. Cuestiona al principio de estasis estructural y el reduccionismo moderno, aunque lo hace mediante una descripción de la flexión desde los paradigmas heredados de la mecánica clásica, la elástica moderna, y el cálculo diferencial, tanto en nuestro caso de estudio como en otros trabajos

aquí citados, por ejemplo, el modelo de flexión Euler-Bernoulli (Lienhard, 2014), la elástica de Timoshenko & Goodier (1951), y el Método del Elemento Finito (LaMagna, Schleicher, & Knippers, 2016). Con la reflexión anterior intentamos desmitificar el uso de herramientas computacionales como el camino hacia un progreso universal, y entenderlas como manifestaciones heterogéneas, cambiantes, contradictorias e indeterminadas.

Si lo sociotécnico es visto como un fenómeno contingente, para proponer un entendimiento de la "realidad social" no es suficiente explicar lo técnico como un factor, o como una "base material". Esta insuficiencia se agudiza al tratar de explicar el comportamiento de sociedades altamente tecnificadas. Teorías que rechazan una ontología analítica (que separa sociedad de entorno antropogénico), como las de DeLanda, Haraway, Oldenziel, Simondon, Deleuze, Bijker, y Feenberg, (entre otras), intersectan entendimientos profundos de lo técnico y lo social, dándonos una base teórica para hablar de lo sociotécnico. Los ensambles sociotécnicos tienen la capacidad de autoreproducción ideológica (como se explica en el párrafo previo) y material. Los sistemas industriales y las cadenas internacionales de trabajo, extracción de recursos naturales, transformación y producción de valor son integrados por seres humanos, objetos antropogénicos (con diferentes grados de automatización para la realización de operaciones materiales y cognitivas), y ecosistemas. Las relaciones que suceden en los ensambles sociotécnicos no son únicamente relaciones sociales explícitas, sino que muchas de estas relaciones suceden al nivel del objeto técnico, en la interacción objeto-ecosistema, objeto-objeto, u objeto-humano. En los trabajos citados hay aproximaciones de diferentes escalas cómo suceden estas relaciones, y de cómo se constituyen los ensambles sociotécnicos.

Esta tesis intenta mantener una postura crítica a los conceptos de optimización, simulación y automatización tomando en cuenta la medida en que son utilizados como recursos ideológicos para sostener ciertas estructuras de poder que podríamos describir como tecnocráticas, reconociendo la relación que hay entre lo tecnocrático y lo neocolonial, extractivista, patriarcal y capitalista. ¿Cómo desde el diseño computacional se puede rechazar el suprematismo tecnocientífico instituido en la academia, la industria y el estado?

2.SIMULACIÓN

"(...) What do you consider the largest map that would be really useful?"

"About six inches to the mile."

"Only six inches!" exclaimed Mein Herr. "We very soon got to six yards to the mile. Then we tried a hundred yards to the mile. And then came the grandest idea of all ! We actually made a map of the country, on the scale of a mile to the mile!"

"Have you used it much?" I enquired.

"It has never been spread out, yet," said Mein Herr: "the farmers objected: they said it would cover the whole country, and shut out the sunlight! So we now use the country itself, as its own map, and I assure you it does nearly as well."

Lewis Carroll, Sylvie and Bruno Concluded, 1895



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

2.Simulación

Modelado matemático y simulación computacional de las deformaciones elásticas axial y rotacional de elementos estructurales lineales.

El diseño y especialmente el diseño computacional (Gengnagel, Kilian, Palz & Scheurer) se apoyan fuertemente en la abstracción la generación de modelos de pensamiento. El desafío en una abstracción reside en la invención de un constructo que pueda representar fenómenos del mundo real, con base en operaciones abstractas. Este paradigma está fuertemente arraigado en el pensamiento científico, y la cultura occidental. La aparición de nuevos modelos puede comenzar desde la fluctuación de modelos anteriores, configurado por el pensamiento y modificado a medida que se perfecciona. El cómputo permite un uso de los modelos independiente a quien los crea, dejándolos disponibles para su uso como herramientas de diseño. Los modelos no se limitan a información tridimensional, sino que pueden ser holísticos: se puede incorporar modelos de diferentes disciplinas, afectando sustancialmente el proceso de diseño. La relación que existe entre el uso de modelos computacionales y los resultados del diseño es una pregunta fundamental en el diseño computacional.

2.1.Modelo y simulación

2.1.1.Definición

Un modelo matemático (Cirrito & Tobin 2004) busca representar parte de un proceso o fenómeno. Generalmente el modelo se reduce a un conjunto de ecuaciones que describen aspectos del proceso, existe el modelado determinista y el probabilístico. En el determinístico el estado del sistema puede ser determinado y predicho enteramente por reglas matemáticas o lógicas.

Los modelos numéricos (Atamturktur et al., 2015) son representaciones aproximadas a fenómenos reales, lo que implica invariablemente cierto grado de inexactitud que se puede atribuir a a) la incompletitud del modelo matemático (principios físicos o matemáticos) b) imprecisión de valores de entrada, c) incertezas numéricas incurridas al resolver las ecuaciones matemáticas. La incompletitud del modelo físico se refiere a los fenómenos físicos que son totalmente desconocidos o que son conocidos pero demasiado complejos para ser incorporados al modelo. La incompletitud invariablemente causa un sesgo sistemático en las predicciones del modelo. La imprecisión de los parámetros de entrada son típicamente los que generan incertezas en las predicciones.

De acuerdo a Atamturktur et al. (2014) existen dos aspectos básicos para desarrollar un modelo numérico. El primero "h" que relaciona valores conocidos

de “x” con valores desconocidos de “y”, donde x representa datos pertenecientes al dominio de aplicabilidad, y el segundo “t” que representa parámetros que corresponden a constantes, e.g. propiedades mecánicas de los materiales. “h” representa los principios físicos usados para establecer la relación entre las variables “x” y “y”, mientras que “t” representa parámetros generalmente conocidos con menor precisión que están asociados con los principios pertenecientes a “h”. Los parámetros “t” se calibran para lograr una mayor exactitud del modelo mediante experimentación empírica. Es importante que los experimentos en cuestión exploren el dominio operacional de un modelo, característica conocida como cobertura, para disminuir el sesgo de predicción a lo largo del dominio operacional.

2.2. Modelo matemático

2.2.1. Teoría elástica clásica

Todos los materiales (Timoshenko & Goodier, 1951) poseen hasta cierto punto la propiedad de elasticidad, i.e. si fuerzas externas sobre un cuerpo que producen deformación no exceden cierto límite, la deformación se revierte al remover las fuerzas. Los materiales estructurales como el acero se consideran isotrópicos, a pesar de no tener una estructura molecular/cristalina heterogénea porque su comportamiento se puede modelar con gran exactitud gracias a la distribución aleatoria de los cristales en el cuerpo, haciendo posible la suposición de que el material es isotrópico. Cuando las propiedades del material en un cuerpo varían en diferentes dimensiones, se debe considerar la condición de anisotropía. El esfuerzo es la cantidad de fuerza por unidad de área, se divide en dos componentes: esfuerzo normal, que es perpendicular al área, denotado por sigma “ σ ” y el esfuerzo cortante, que es paralelo al área, denotado por tau “ τ ”. Con deformación nos referimos al desplazamiento de las partículas en un cuerpo deformado. Cuando hablamos de un cuerpo recto (por ejemplo un cable o una barra) podemos hablar de elongación, que se denota por epsilon ϵ .

2.2.2. Resorte Longitudinal para esfuerzo normal: Ley de Hooke

La relación entre la fuerza y la deformación fueron investigadas de manera experimental y establecidas mediante un teorema conocido como Ley de Hooke, expresada en la ecuación:

$$\epsilon = \sigma/E$$

donde “E” es el módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, “ ϵ ” es la deformación dada por $\epsilon = \Delta L/L$ (L=longitud del elemento vectorial) y “ σ ” es el esfuerzo (F/A, fuerza sobre área de la sección del elemento vectorial), la rigidez puede ser expresada con la expresión $K = AE/L$. (Timoshenko & Goodier, 1951)

2.2.3. Resorte Radial para flexión

Basado en el resorte rotacional de Hooke, Kuijvenhoven (2009) utilizó un método para la representación analítica de la flexión, mediante la siguiente expresión:

$$M=(EI/L) \theta$$

donde “M” representa el momento flexionante, θ representa el ángulo en radianes, “EI/L” es la rigidez a flexión, “L” representa la distancia internodal (longitud del segmento de barra), “E” el módulo de elasticidad e “I” el momento de inercia de la sección de la barra en el sentido flexionado.

2.3. Modelo físico analógico

Modelos físicos analógicos para la representación de fenómenos mecánicos para la optimización

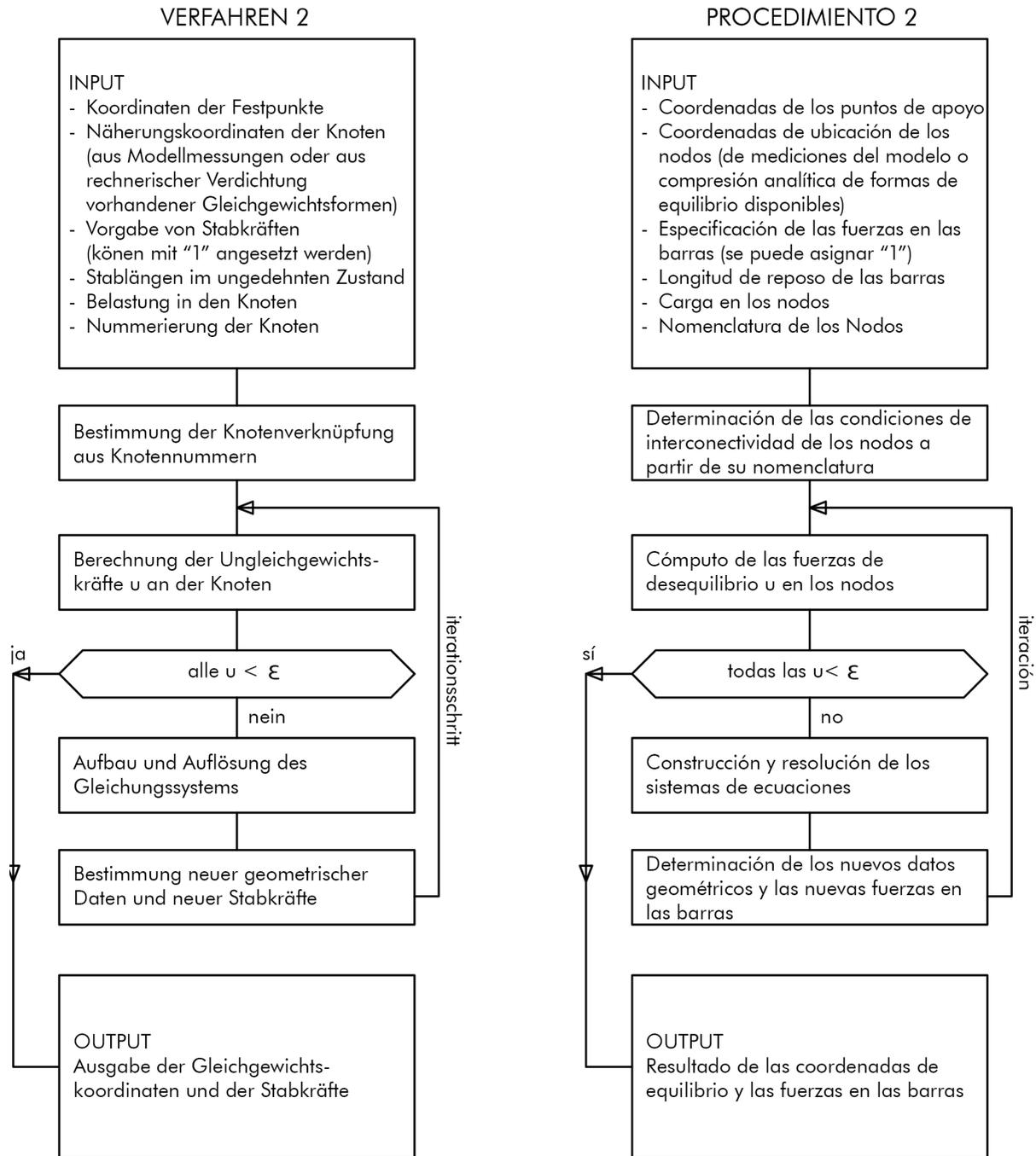
A inicios del siglo XX (Kilian & Ochsendorf 2005) Antoni Gaudí empleo modelos colgantes para encontrar formas estructurales para sus proyectos de la capilla de la colonia Guell y los arcos de la casa Mila. Durante cuatro décadas Heinz Isler promovió el uso de modelos físicos para descubrir formas estructurales tridimensionales óptimas, de manera similar Frei Otto y sus colegas en la Universidad de Stuttgart a partir de la década de 1960 desarrollaron experimentos físicos con un alto grado de exactitud para encontrar formas óptimas de redes traccionadas, superficies mínimas y cascarones reticulares a compresión.

2.4. Modelo numérico

Modelos numéricos para la representación de fenómenos mecánicos para la optimización

En 1970 (Otto et al. 1973) en un trabajo colaborativo entre el ILEK (Instituto de Estructuras de Superficie Ligeras) y el IAGB (Instituto de Aplicación de Geodésicas en la Construcción) (ambos de la Universidad de Stuttgart) los equipos de Frei Otto y Klaus Linkwitz desarrollaron los procedimientos y sistemas programados para la simulación de redes de cables a tracción. [Figura 2.1] Estos procedimientos fueron puestos en práctica por primera vez para la simulación de las cubiertas del Estadio Olímpico de München. En enero de 1972 utilizaron un método similar para la simulación de redes colgantes como proceso de Form-Finding de cascarones reticulares a compresión.

Kilian & Ochsendorf (2005) en el MIT realizaron un modelo de partícula-resorte muy similar al utilizado por Otto y Linkwitz en 1970 también para explorar formas funiculares. Los sistemas de partícula-resorte (particle-spring



[Figura 2.1] Diagrama de flujo (original y traducción) del proceso de cómputo para simular la red colgante, publicado en IL 10 Gitterschalen pp.188-189. Las fuerzs de las barras y las coordenadas tridimensionales de cada nodo en la red suspendida fueron computados. Todas las barras fueron consideradas como líneas cuya extensión es posible axialmente, idealizadas de acuerdo a la ley de Hooke. Los nodos fueron considerados como uniones sin fricción, por lo que no existe transmisión de momentos. Cualquier momento flexionante en el sistema es ignorado. El tamaño posible de la red computada está limitado por la capacidad de memoria de la computadora usada (CDC 6600), límite cercano a 3,000 nodos (Otto et al. 1973).

systems) se modelan mediante partículas ubicadas por coordenadas con fuerzas representadas por vectores, donde las fuerzas están definidas por a) las cargas puntuales en la partícula y b) por resortes que conectan las partículas. Los resortes generan una fuerza cuando tienen una elongación que altera la longitud de reposo, el comportamiento que genera la fuerza es obtenido por la ley de Hooke. Cada partícula en el sistema tiene una posición, velocidad y masa al igual que un vector que representa la suma de las fuerzas actuando en ella que se utiliza para aplicar una fuerza sobre la partícula para desplazarla.

El objetivo de la simulación, tanto la de Otto et al. (1973) como la de Kilian & Ochsendorf (2005), es encontrar el punto de equilibrio estático donde la sumatoria de fuerzas actuante en cada partícula sea 0. Usualmente al inicio de la simulación el sistema no está en equilibrio, así que las partículas se desplazan mediante el vector que suma las fuerzas en cada iteración, hasta que su desplazamiento gradual converge en un estado de equilibrio parcial. El estado de equilibrio total nunca se alcanza, la sumatoria de fuerzas en cada partícula se aproxima a 0 gradualmente y el sistema continuará refinando la posición de las partículas hasta que se finalice el proceso.

Los cascarones reticulares de doble curvatura, cuya construcción era mediante la flexión de las barras, no consideraban para la definición de su forma las propiedades de flexión de sus componentes. Actualmente las potentes herramientas de simulación que existen posibilitan la simulación de grandes deformaciones por flexión liberando el potencial de la flexión activa. (Lienhard, Alpermann, Gengnagel, & Knippers, 2013)

Kuijvenhoven (2009) realizó un modelo de partícula-resorte para cascarones reticulares al que añadió la capacidad de simular el comportamiento a flexión de las barras, donde consideraba las barras de la retícula como continuas, como en los sistemas constructivos utilizados por Otto. El modelo numérico utilizado para esta investigación está basado en los de Otto et al. (1973), Kilian & Ochsendorf (2005), y Kuijvenhoven (2009).

2.5.Simulación del CRGFA

2.5.1.Programas

Se utilizaron para esta investigación los programas: Rhinoceros 3D, que es un modelador de geometría tridimensional; Grasshopper3D, editor de algoritmos con interfaz gráfica; y Kangaroo Physics, simulador de física interactivo.

2.5.2.Descripción del proceso de simulación

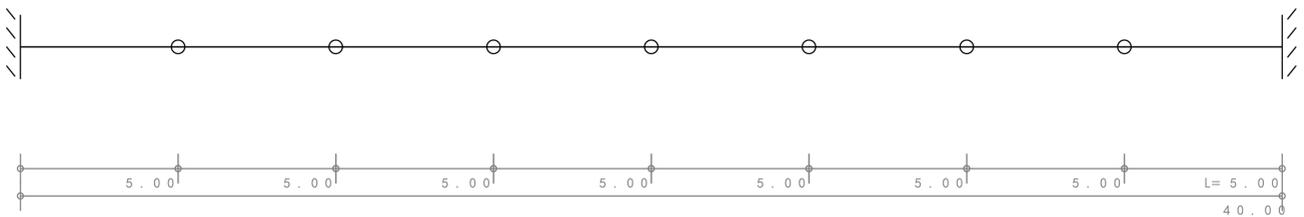
Para esta explicación se entenderá algoritmo como: una serie de pasos para realizar un proceso, y se entenderá definición como: la serie de comandos en el programa Grasshopper 3D para realizar el proceso específico. Se explicará el proceso tanto en términos de física como en términos de cómputo de manera paralela.

El cascarón reticular geodésico de flexión activa será analizado en dos escalas, primero se explicará el proceso para simular el comportamiento mecánico de los tramos internodales de las barras geodésicas y después el proceso de simulación global. Las barras utilizadas para la fabricación de este sistema pueden comportarse de dos maneras: a) la barra inicialmente es recta, y se deforma únicamente dentro de su rango de comportamiento elástico y simultáneamente sufre la acción de cargas gravitacionales y accidentales, b) la barra inicialmente recta se deforma hasta llegar al rango de comportamiento plástico, y posteriormente se deforma elásticamente gracias a la acción de cargas gravitacionales y accidentales. El primer método será utilizado cuando se contemplen materiales con rangos elásticos grandes, e.g. elastómeros, polímeros plásticos, y algunas maderas y aleaciones con grandes rangos elásticos, el segundo método se utilizará para materiales con una menor elasticidad pero cuyo rango plástico sea también lo suficientemente alto para deformarlo sin que sufra una falla frágil o dúctil. Se utiliza un indicador booleano que señala si existen barras cuya deformación supere los rangos del material y sección utilizados.

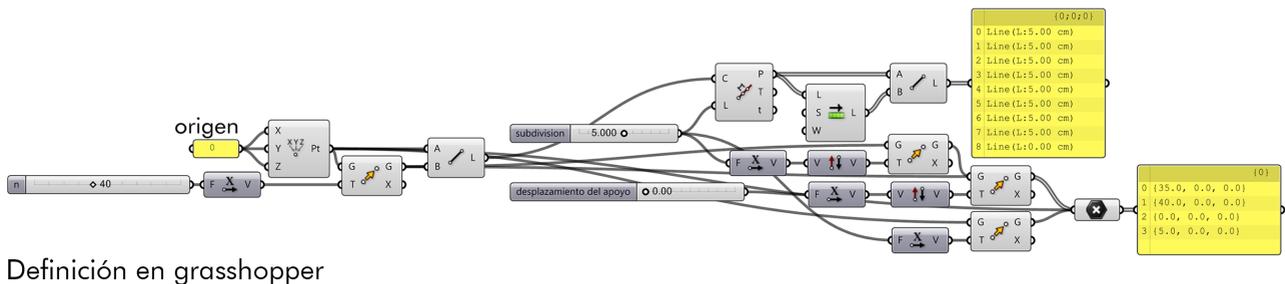
El proceso de simulación del tramo intermodal de una barra se puede explicar en dos pasos de representación, una geométrica y la otra mecánica:

2.5.2.1. Modelo geométrico (discretización paramétrica)

Se genera un tramo internodal, ya sea una línea recta o una curva. Puede generarse entre dos puntos A y B. El tramo internodal se subdivide en segmentos con una distancia dada "L" donde la longitud total "ΣL" es un múltiplo de la longitud de subdivisión. A medida que "L" sea menor, el resultado tendrá una precisión mayor en la representación de la curvatura generada por la deformación. Mediante la segmentación del tramo se generan líneas rectas y coordenadas de las partículas. Finalmente se seleccionan las partículas para que sean los apoyos articulados del tramo. El tramo puede contener tantos apoyos como partículas, sin embargo típicamente serán las de los extremos. En la simulación de este tramo de barra se seleccionaron las primeras dos partículas consecutivas de cada extremo para representar un apoyo empotrado.



Representación geométrica de tramo internodal y partículas



Definición en grasshopper

[Figura 2.2] Arriba: Representación geométrica de la barra con simbología, donde los círculos representan las partículas y los símbolos de empotramiento representan las dos partículas en los extremos. Abajo: Definición en Grasshopper3D

2.5.2.2.Representación mecánica

Para la simulación se utilizan los dos modelos matemáticos para la representación de las deformaciones elásticas de las secciones 2.2.2. y 2.2.3. de este capítulo:

2.5.2.2.1.Deformación longitudinal por fuerza axial

Para la deformación por fuerza axial se utiliza el resorte longitudinal de Hooke para representar cada tramo:

$$\varepsilon = \sigma/E$$

donde "E" es el módulo de elasticidad de un material elegido, "ε" es la deformación relativa del tramo dada por $\Delta L/L$ y "σ" es el esfuerzo (F/A, fuerza entre área de la sección de la barra).

Representado de manera expandida tenemos que:

$$\Delta L/L=(F/A)/E,$$

de la que se obtiene la relación entre Ka (rigidez axial), F (fuerza) y ΔL (deformación absoluta) a continuación:

$$AE/L=F/(\Delta L)$$

En la simulación de "kangaroo Physics" (figura 2.3) se utiliza el comando "Springs from line" que procesa un conjunto de resortes cuyas acciones individuales repercuten en el estado de equilibrio de los demás y viceversa. Los parámetros que se insertan son:

- a) connection: vector entre dos partículas,
- b) stiffness: rigidez "Ka" que se obtiene de $K=EA/L$,
- c) rest length: longitud de reposo "L" del resorte,

2.5.2.2.2.Deformación rotacional por momento flexionante

Para la deformación por flexión se utiliza el resorte rotacional de Hooke en cada partícula como relación angular entre dos tramos interconectados:

$$M=(EI/L) \theta$$

donde "M" representa el momento flexionante, θ representa el ángulo en radianes entre dos tramos consecutivos, "EI/L" es la rigidez rotacional "Kr", "L" representa la longitud del segmento de barra, "E" el módulo de elasticidad del material, e "I" es el momento de inercia de la sección de la barra.

En la simulación de "kangaroo Physics" [Figura 2.3] se utiliza el comando "Bend" que procesa la relación entre las fuerzas y los ángulos entre dos vectores generados por tres puntos. Los parámetros que se insertan son:

- a) N-1: punto anterior al resorte longitudinal. Se obtiene de la lista de partículas eliminando los últimos dos valores. Se inserta en "point 1",
- b) N: ubicación del resorte longitudinal. Se obtiene de la lista de partículas, eliminando el primer y último valor. Se inserta en "point 2",
- c) N+1, punto posterior al resorte longitudinal. Se obtiene de la lista de partículas eliminando los primeros dos valores. Se inserta en "point 3",
- d) rigidez "Kr" que se obtiene de $K=EI/L$ en "bend strenght", los valores de "E" y "L" son iguales a los del resorte longitudinal,
- e) ángulo de reposo en "rest lenght", que cuando la barra es recta su valor es 0π .
- f) Condiciones de carga y apoyo
- g) Carga gravitacional
- h) Se representa como un vector de fuerza aplicado en cada partícula cuya dirección es Z negativo y la magnitud para este ejemplo es equivalente a la masa-fuerza de la estructura que se obtiene de la expresión $P=ALD$, donde "P" es la carga puntual en la partícula, "A" es el área de sección de la barra, "L" es la longitud del segmento, y "D" es la densidad del material. Se considera la posibilidad de un factor de carga, pero se le asigna un valor de 1.00 porque no existen cargas adicionales.
- i) Apoyos.

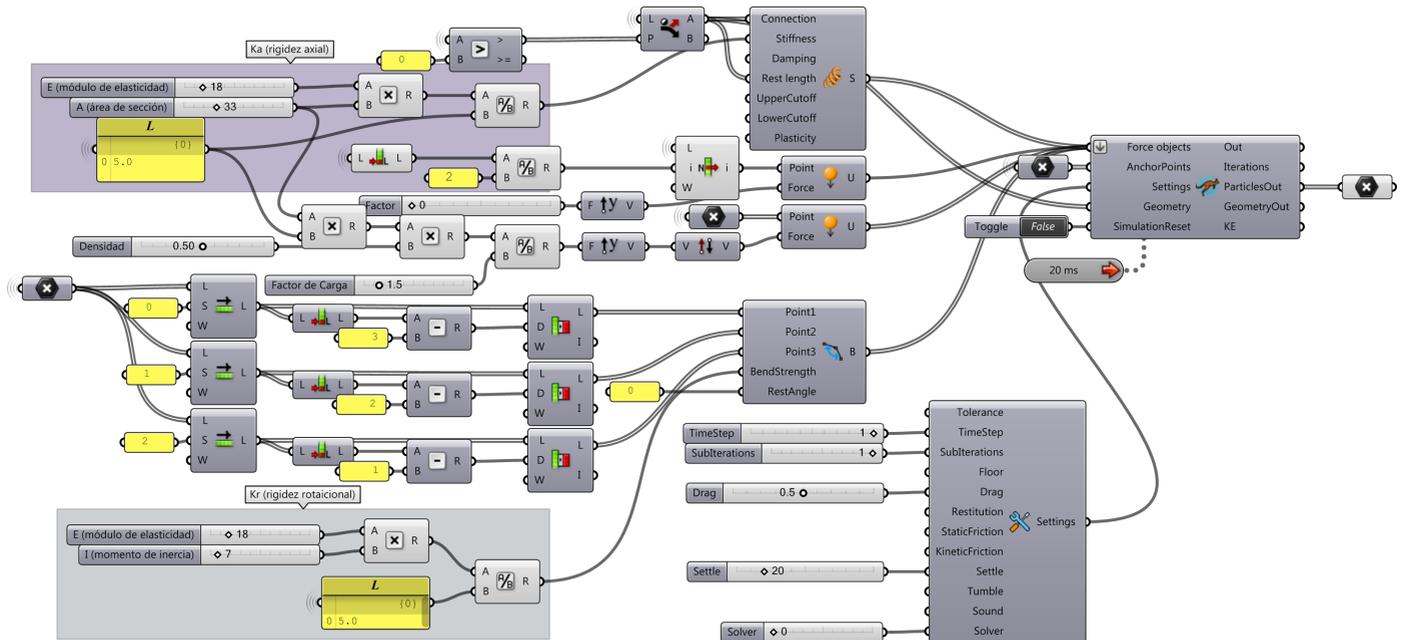
Para la simulación de esta barra se tomaron las dos partículas de cada extremo como articulaciones para asemejar el comportamiento de un apoyo empotrado.

2.5.2.2.3.Descripción de simulación computacional para encontrar el estado de equilibrio del sistema mecánico

El simulador de Kangaroo physics puede utilizar diferentes métodos para computar el estado de equilibrio de un sistema mecánico, para esta investigación se utilizó el algoritmo Velocity-Verlet que opera con los siguientes pasos:

- a) Comienza con una posición (x,y,z) de partículas, cada una con una velocidad y una fuerza iniciales. Las fuerzas iniciales son las cargas puntuales "P" generadas por el producto de la masa y la aceleración gravitacional del miembro estructural, y la velocidad inicial es $v=0$ en todas las partículas (a menos que se le asignen valores diferentes).
- b) Se suman las fuerzas "f" aplicadas a la partícula en tiempo $t=0$ (si se le

[Figura 2.3] Definición para la simulación en Grasshopper3D y Kangaroo Physics. Los comandos “springs from line” y “bend 3 point” contienen los parámetros para generar los sistemas de ecuaciones que ayudarán a encontrar el equilibrio estático en la simulación. El comando “Kangaroo Physics” realiza el proceso de simulación, i.e., las matrices de sistemas de ecuaciones que mediante un método iterativo (con el método Velocity-Verlet) encuentra las coordenadas de los puntos que resultan en un sistema en equilibrio estático.

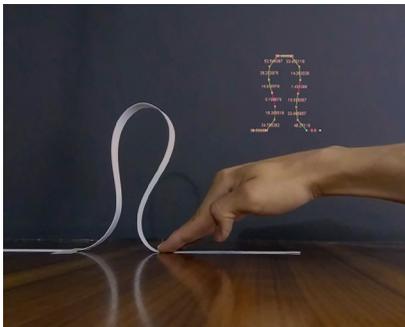
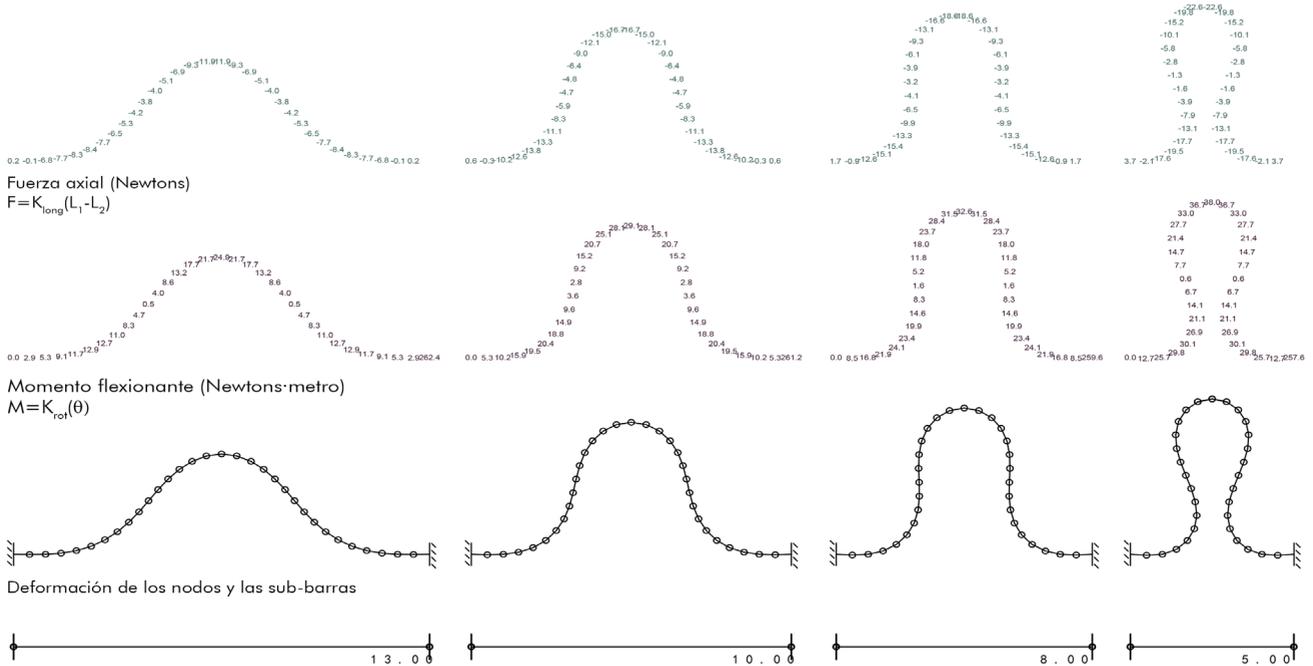


aplica un factor de “damping” a los resortes, su fuerza será dividida entre el factor “nd” para reducir su efecto en la sumatoria de fuerzas en la partícula, haciendo que se desplace con mayor lentitud, simulando el comportamiento viscoso del resorte. El valor de damping utilizado es nd=10 que permite una convergencia más rápida de la simulación)

- c) Se desplaza la partícula hacia su nueva posición en $t=1$, utilizando el vector fuerza como equivalente a un vector posición (en la simulación se utiliza un arrastre viscoso en el desplazamiento de las partículas con valor de uno, por lo que su efecto es nulo).
- d) Se calcula la velocidad de la partícula en un paso temporal intermedio $t=0.5$
- e) Se calcula la fuerza en el paso temporal $t=1$
- f) Se calcula la velocidad de la partícula en un paso temporal $t=0.5c$
- g) Se repite el proceso hasta que la sumatoria de fuerzas se aproxime a cero: satisfaciendo la expresión $\sum f \approx 0$, bajo ciertas condiciones o número de iteraciones.

2.5.2.3. Representación de resultados

Mediante la simulación se obtiene la ubicación de las partículas en equilibrio estático. El gráfico a continuación muestra la simulación de una barra donde el apoyo B se desplaza hacia el apoyo A. EL estado de equilibrio mostrado es el obtenido después de 10,000 iteraciones.



[Figura 2.4] Comparación entre simulación de flexión y prueba de flexión con una barra real a escala.

[Figura 2.5] Desplazamiento de las partículas y esfuerzo a lo largo del tramo internodal, de arriba hacia abajo: fuerza axial, momento flexionante, y representación geométrica. De izquierda a derecha se muestra la deformación y los esfuerzos con respecto a la disminución de la distancia entre los apoyos.

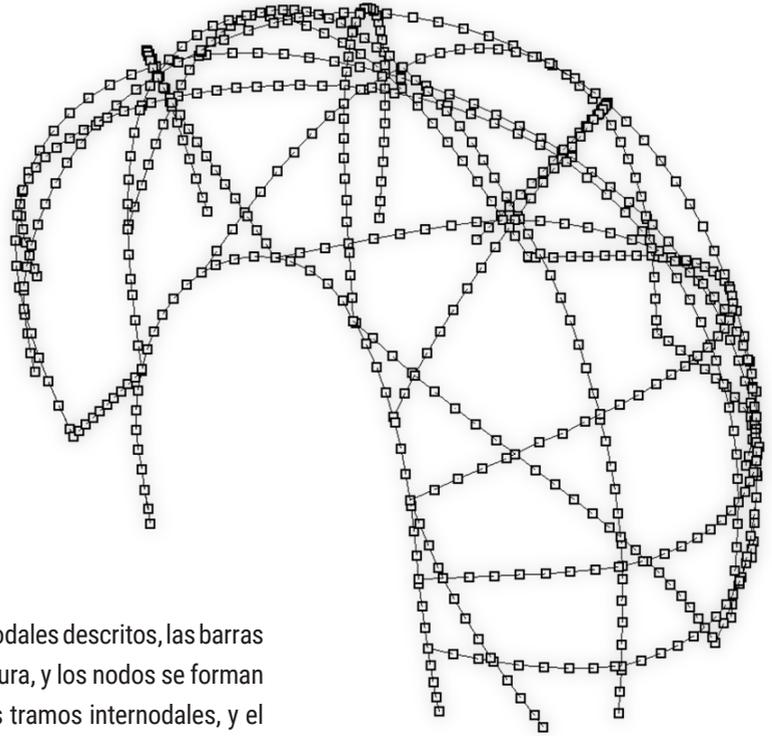
El resultado de la simulación es la nueva ubicación, coordenadas (x,y), de las partículas del sistema. Para obtener los esfuerzos, se computa la diferencia de longitud “ ΔL ” entre el sistema de partículas inicial, y el sistema de partículas deformado. La fuerza axial se obtiene de la siguiente expresión:

$$F = (\Delta L)K_a$$

donde “F” representa la fuerza axial, “ ΔL ” la diferencia entre longitud inicial y longitud final, y K_a la rigidez axial del resorte. El momento flexionante (Kuijvenhoven 2009) se obtiene de la siguiente expresión:

$$M = (\Delta\theta)K_r$$

donde “M” representa el momento flexionante, “K” la rigidez rotacional (dada por EI/L) y “ $\Delta\theta$ ” es la deformación rotacional, o diferencia entre ángulo inicial y ángulo final. Los resultados dados por estas operaciones (realizadas en cada uno de los resortes y en cada una de las partículas) se muestra en la figura 2.4.



2.6.Caso de estudio: Crisálida

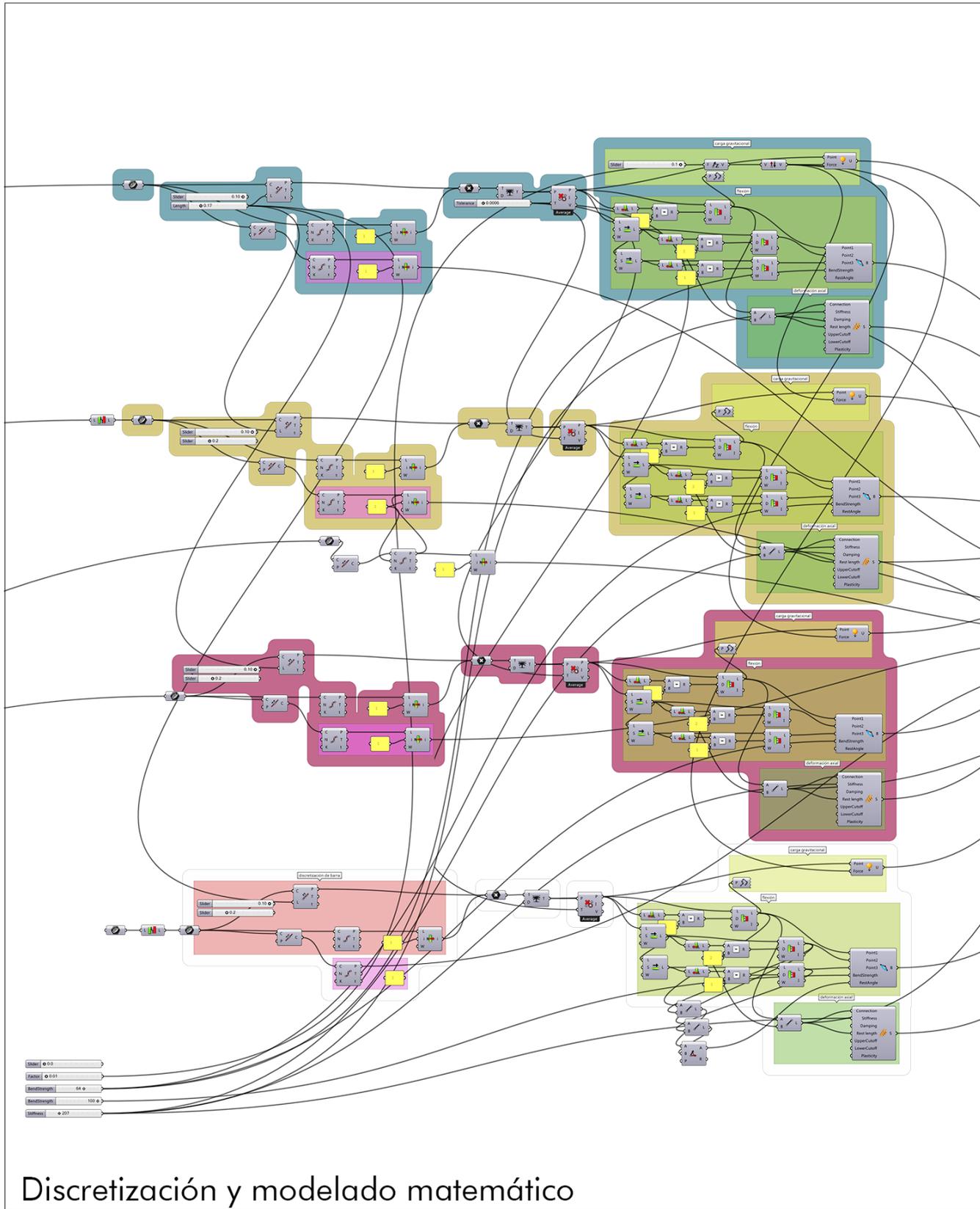
EL sistema de CRGFA se compone de los tramos internodales descritos, las barras son trazos geodésicos sobre la superficie de doble curvatura, y los nodos se forman entre las intersecciones. La barra está formada de varios tramos internodales, y el sistema está formado de barras intersectadas.

Las barras se dividen en las intersecciones, los tramos se subdividen a una distancia dada. La distancia elegida afecta el valor L de las rigideces axial y rotacional entre las partículas, tal efecto es considerado paramétricamente al determinar tales valores. A medida que tal distancia disminuye, aumenta la precisión de la simulación (para la representación de la curvatura formada por la deformación de las barras) pero también incrementa el número de partículas, y en consecuencia, el tamaño de las matrices de datos y la cantidad de iteraciones necesarias para encontrar el estado de equilibrio de la estructura. Se eligió un valor de 0.12m (mediante métodos heurísticos) para definir la distancia entre partículas dentro de un tramo internodal.

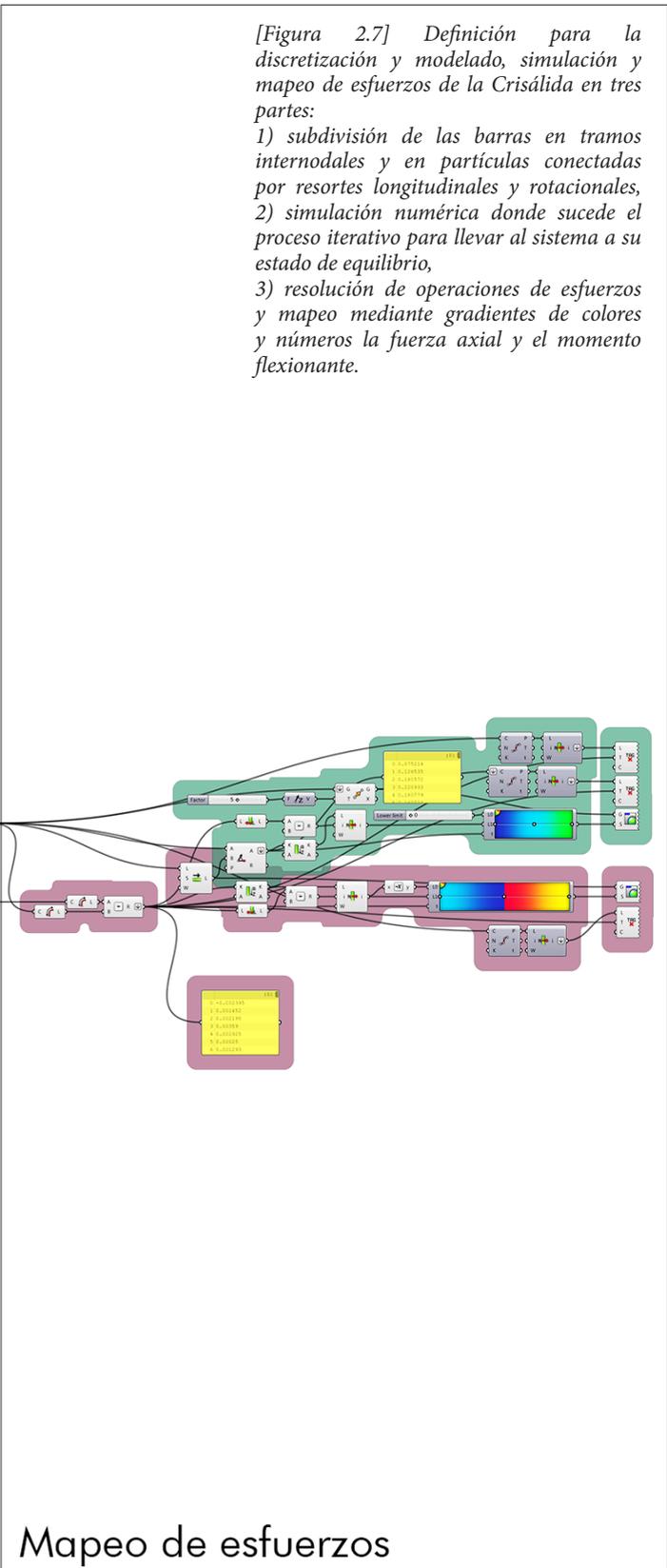
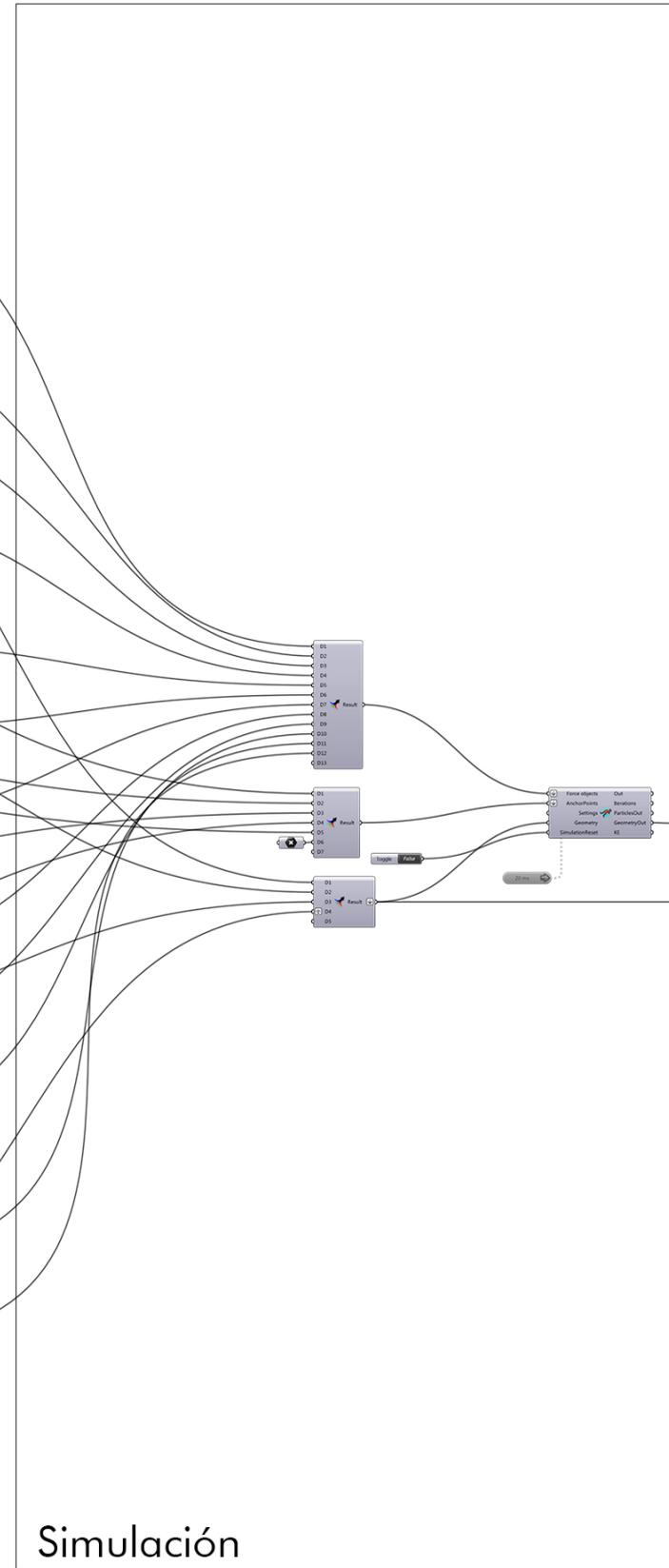
En la crisálida se utilizaron cuatro tipos de barras, las primeras tres (cyan, amarillo y magenta) diferenciadas entre ellas por el sentido que recorrían la superficie de doble curvatura, la cuarta diferenciada de las anteriores por tener una trayectoria curva no geodésica, ubicada en el arco de acceso del cascarón. Las barras son generadas en tres sentidos para a) evitar demasiadas intersecciones en un sólo punto, b) garantizar la estabilidad de la estructura evitando las rotaciones de tijera en los nodos, al tener tres sentidos de barras se generan los suficientes triángulos sobre la superficie del cascarón para evitar tal movimiento, condición que fue corroborada haciendo pruebas con diferentes configuraciones de barras sobre esta y otras superficies.

La simulación fue realizada con diferentes valores de elasticidad "E", área de sección "A" y momento de inercia "I". A continuación se muestra la definición en grasshopper [Figura 2.7] y una representación gráfica de las deformaciones y esfuerzos de la Crisálida [Figura 2.8, 2.9].

[Figura 2.6] Desplazamiento de las partículas y esfuerzo a lo largo del tramo internodal, de arriba hacia abajo: fuerza axial, momento flexionante, y representación geométrica. De izquierda a derecha se muestra la deformación y los esfuerzos con respecto a la disminución de la distancia entre los apoyos.

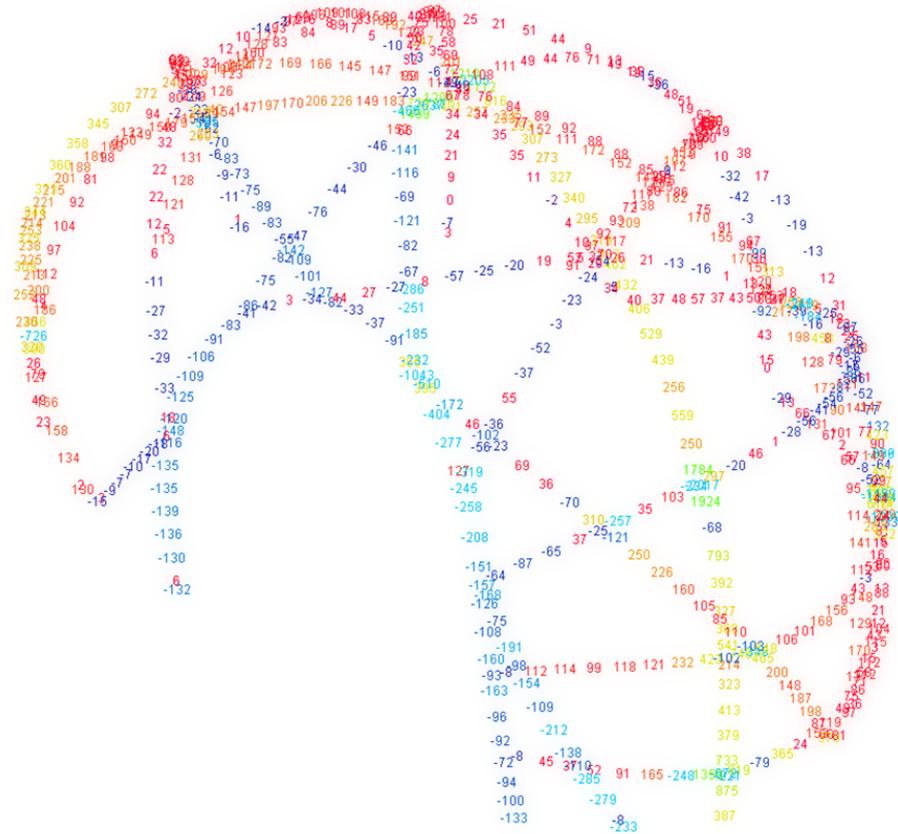


Discretización y modelado matemático



[Figura 2.7] Definición para la discretización y modelado, simulación y mapeo de esfuerzos de la Crisálida en tres partes:

- 1) subdivisión de las barras en tramos internodales y en partículas conectadas por resortes longitudinales y rotacionales,
- 2) simulación numérica donde sucede el proceso iterativo para llevar al sistema a su estado de equilibrio,
- 3) resolución de operaciones de esfuerzos y mapeo mediante gradientes de colores y números la fuerza axial y el momento flexionante.

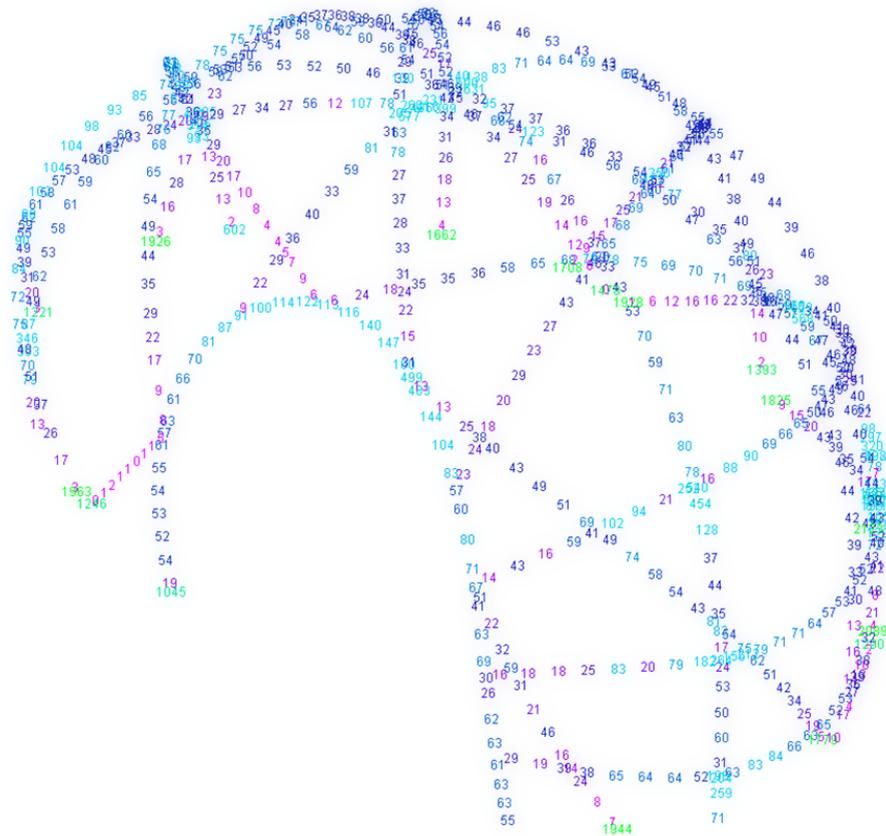


Fuerza axial (Newtons)

$$F = k_a(L_1 - L_2)$$

-300N 2000N

[Figura 2.8] Representación de resultados de la simulación mecánica mediante mapeo de fuerza axial en Newtons donde los valores negativos representan compresión y los positivos tracción correspondiente a una elongación positiva.



Momento Flexionante (Newtons·metro)

$$M = k_{\text{rot}}(\theta)$$

0Nm 2000Nm

[Figura 2.9] Representación de resultados de la simulación mecánica mediante mapeo del momento flexionante en Newtons·metro, el color es equivalente al ángulo de deformación entre segmentos de barra.

2.7. Conclusiones de simulación

Simular el comportamiento en elastomecánico del cascarón reticular además de indicar la factibilidad en términos de estabilidad, también contribuye al entendimiento del fenómeno de deformación elástica. Dado que diferentes modelos detallados en mayor o menor medida y con diferentes algoritmos pueden ser utilizados, se entiende que la aproximación utilizada en este caso de estudio es una de las múltiples posibles maneras de representar la estructura del cascarón, y no debe ser tomada como absoluta. Es decir, "no tomar el mapa por el territorio". Es probable que en un intento por obtener representaciones numéricas de la flexión activa más detalladas en el futuro se busque utilizar el método del elemento finito, que puede posibilitar la incorporación de la fuerza cortante, la torsión y la flexión en el sentido largo de la sección de las barras.

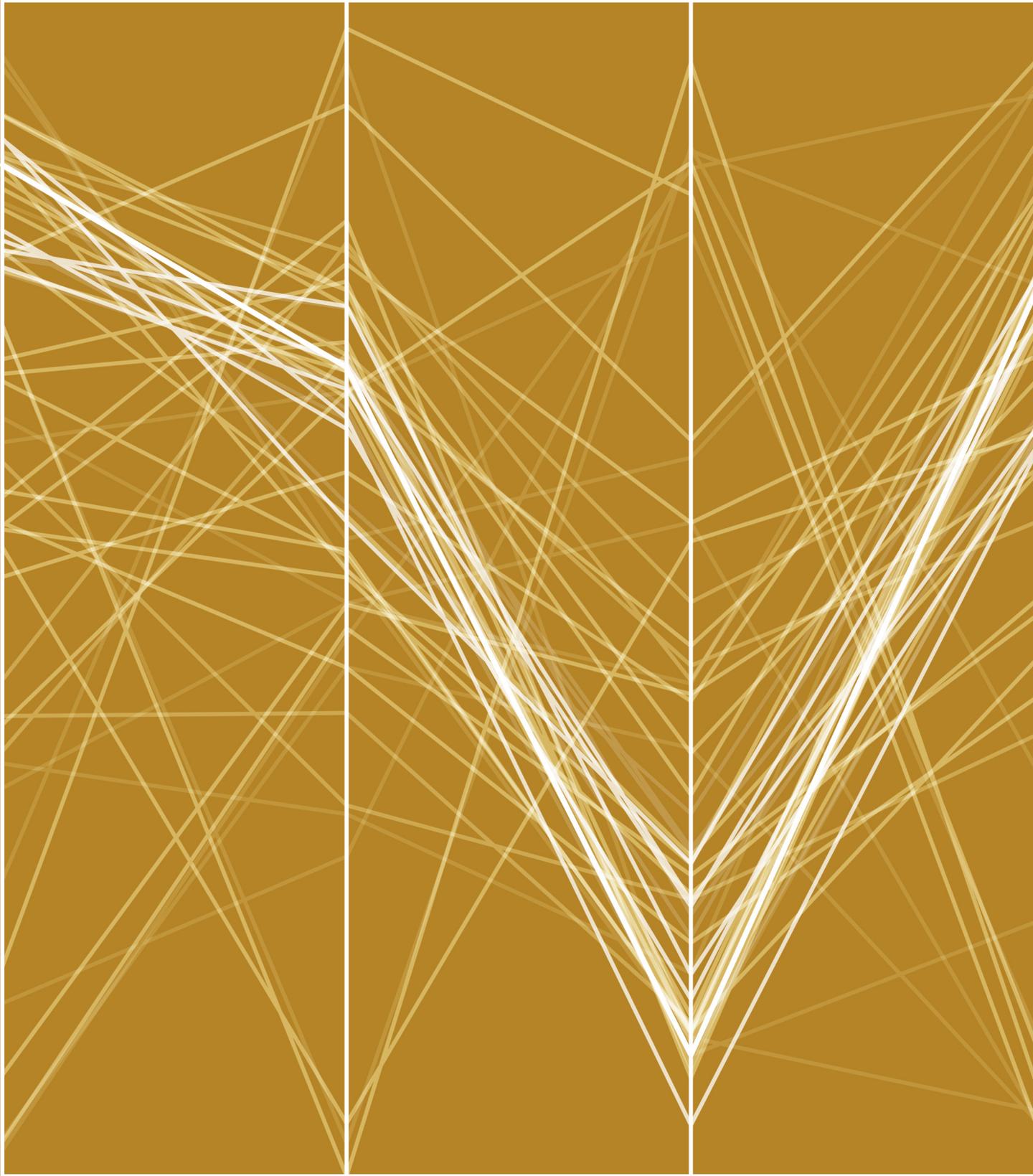
Reconocer las limitaciones concretas en el modelo utilizado (exactitud, precisión, calibración, rango) da pauta para entender los criterios de optimización. Existe una influencia mutua entre el método de optimización y los resultados del proceso de optimización. Entender que "el mapa no es el territorio" nos permite entender también que se puede optimizar computacionalmente un modelo, pero no es posible optimizar el mundo real, en tanto que las condiciones necesarias para realizar un proceso de optimización se dan solamente en el abstracto lógico-matemático del modelo. Nuestra capacidad para generar un modelo lo suficientemente exacto para posibilitar en cierta medida un proceso de optimización y llevarlo a la realidad mediante un proceso de fabricación es en la actualidad muy limitada.

Los conceptos de complejidad, autopoiesis y emergencia, nos ayudan a poner en tela de juicio el materialismo mecanicista que aún domina en el pensamiento técnico. La "optimización material" no ocurre espontáneamente por las leyes naturales, más bien, la capacidad de los sistemas de auto-constituirse o auto-organizarse (autopoiesis) es condición necesaria para su existencia y duración. La sofisticación de los modelos computacionales para la representación de fenómenos nos acerca a una visión de complejidad, sin embargo no hay que olvidar que los modelos son siempre representaciones, y en tanto que esas representaciones son una reducción de la realidad a valores numéricos, son computables.

"En aquel Imperio, el Arte de la Cartografía logró tal Perfección que el mapa de una sola Provincia ocupaba toda una Ciudad, y el mapa del Imperio, toda una Provincia. Con el tiempo, estos Mapas Desmesurados no satisficieron y los Colegios de Cartógrafos levantaron un Mapa del Imperio, que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él.

Menos Adictas al Estudio de la Cartografía, las Generaciones Sigüientes entendieron que ese dilatado Mapa era Inútil y no sin Impiedad lo entregaron a las Inclemencias del Sol y los Inviernos. En los desiertos del Oeste perduran despedazadas Ruinas del Mapa, habitadas por Animales y por Mendigos; en todo el País no hay otra reliquia de las Disciplinas Geográficas."

Del rigor de la ciencia (Borges, 1946)



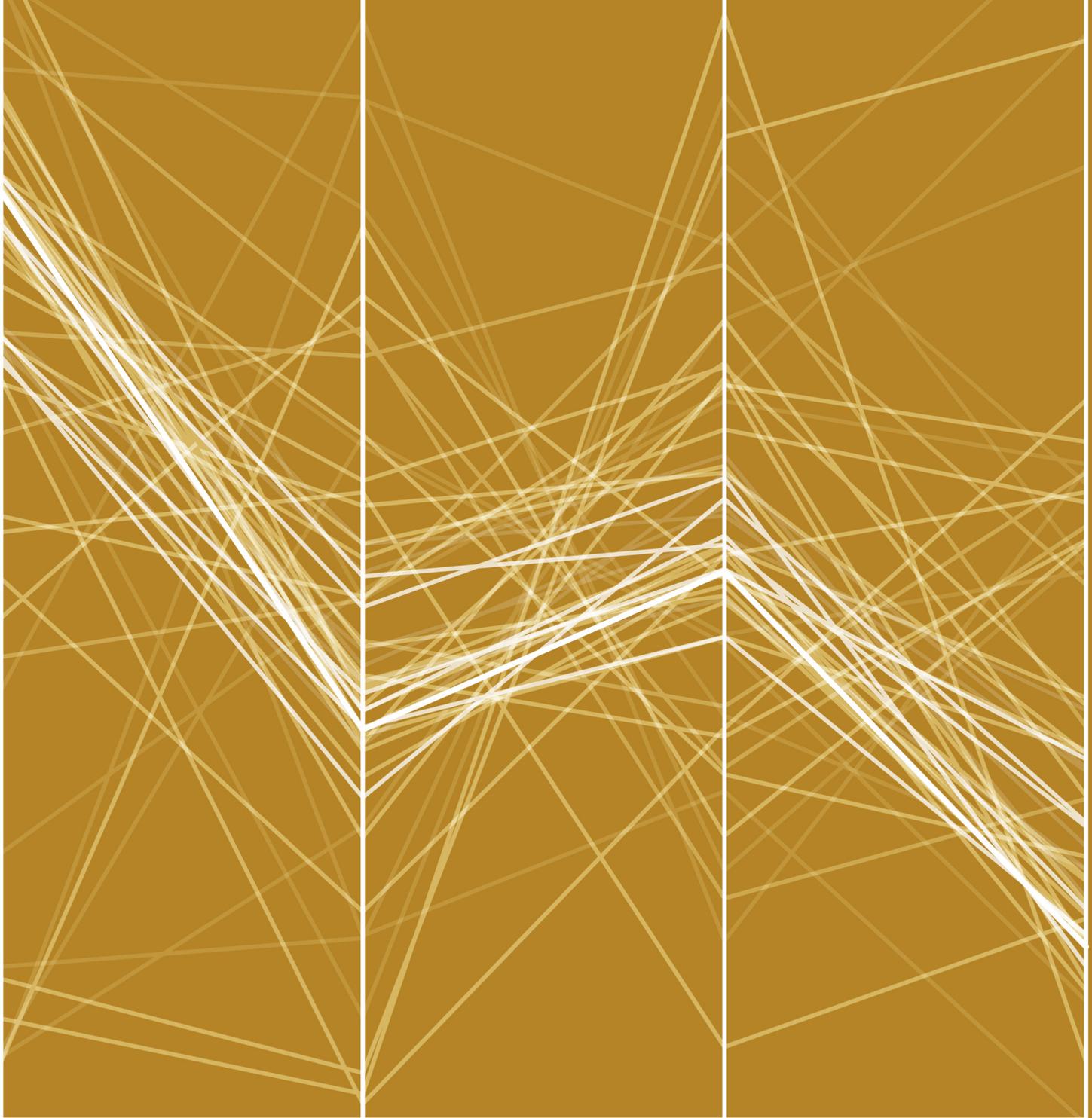
gen1

gen2

gen3

gen4

3.OPTIMIZACIÓN



gen4

gen5

gen6

gen7



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

3.Optimización

3.1.Introducción

En este capítulo se abordará el tema Optimización en Diseño Arquitectónico, generalmente referido en la literatura como ADO¹. Se explicará su base teórica y algunos métodos comunes en la ADO y se revisarán dos casos de estudio donde se aplica para un CRGFA², en el primer caso se hará una evaluación comparativa de cuatro algoritmos de optimización en un problema con un solo objetivo y en el segundo se resolverá el mismo caso de estudio como problema multi-objetivo con el frente de Pareto. Al final se discutirá el papel de la optimización en la práctica arquitectónica, y las implicaciones de su uso.

El matemático Michael Powel (2015) afirmó que muchos fenómenos de optimización ocurren en el mundo natural, por ejemplo una película de jabón que se transforma en una superficie cuya área es mínima, o un sistema atómico que decae en un estado de mínima energía, y que también resultan de la búsqueda de objetivos técnicos, por ejemplo, en el diseño de un puente cuyo costo sea mínimo y su estabilidad fija, o un tratamiento médico que maximice la cura minimizando los efectos secundarios. En décadas recientes (Nguyen, Reiter & Rigo, 2014) la aplicación de simulaciones computacionales para la representación del comportamiento de sistemas complejos ha emergido como un método prometedor, e.g., las sofisticadas simulaciones de comportamiento térmico y gasto energético en edificaciones. Las técnicas de simulación incorporadas al diseño paramétrico (que permite la generación automática de variaciones del objeto diseñado) posibilitan la incorporación de la evaluación de cientos o miles de opciones y poder observar su desempeño a las prácticas de diseño. Consecuentemente las técnicas de optimización basadas en simulación (Diez, Volpi Serani, Stern & Campana 2019) se han desarrollado en las décadas recientes integrando diseño paramétrico, técnicas de simulación y algoritmos de optimización. En este marco, el CRGFA², que es en principio paramétrico, y cuyo comportamiento estructural se representa mediante simulaciones, puede ser mejor entendido desde el paradigma de un "diseño informado por el desempeño"³.

3.2.Métodos de optimización

3.2.1.Definición

De acuerdo a Nguyen, Reiter, & Rigo (2014) el término optimización se refiere al proceso de hacer algo (un diseño, sistema o decisión) tan perfecto, funcional o efectivo como sea posible. En matemáticas, estadística y otras ciencias (Jahn, 2007; Nguyen et al., 2014; Wortmann 2017a) la *optimización matemática* es el proceso de encontrar la mejor solución a un problema entre un conjunto de opciones disponibles (espacio de búsqueda), abordado como la búsqueda del

1. ADO son las siglas de "Architectural Design Optimization", en español, Optimización en el Diseño arquitectónico utilizadas por Wortman (2018).

2. CRGFA son las siglas de Cascarón Reticular Geodésico, descrito a detalle en el primer capítulo de este trabajo.

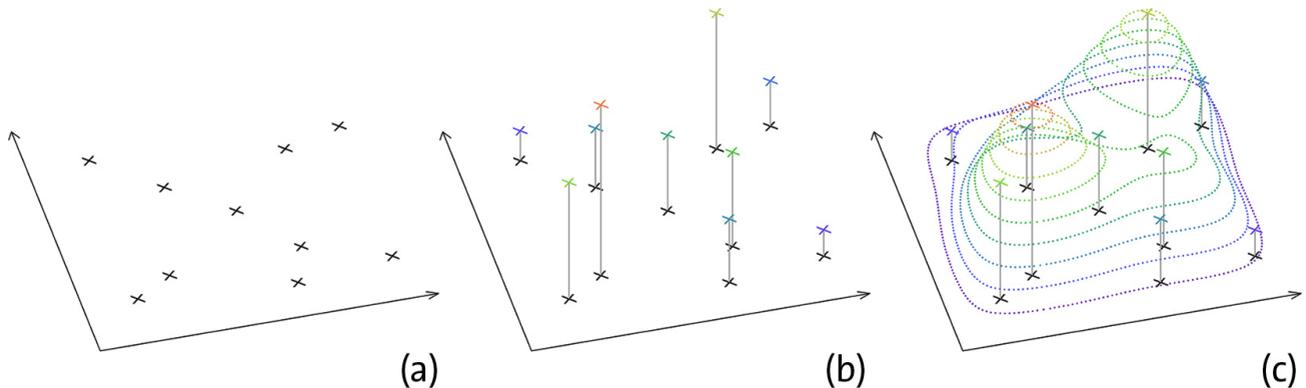
3. Performance-informed design. (Diez, Volpi Serani, Stern & Campana 2019)

punto mínimo (o máximo) de una función (llamada función objetivo) en un espacio vectorial R^n , es decir, un espacio de números reales con n dimensiones. En la optimización basada en simulaciones para la arquitectura y la edificación (Nguyen et al., 2007; Wortmann, 2017a), *optimizar* no necesariamente implica una solución matemática exacta, sino un proceso de discernimiento realizado por quien diseña, apoyándose en herramientas computacionales, como los algoritmos de modelado, simulación y optimización.

Un problema de optimización puede representarse con la siguiente notación:

$$\text{Min } \{f(x): x \in [x^L, x^U] \subseteq R^n, x_i \in Z \forall i \in I\}, \text{ (OPT) } \text{nota3}$$

donde los vectores x^L, x^U representan las fronteras superior e inferior del conjunto delimitado de variables independientes, y $I \in \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de índices que deben tomar valores enteros. Un punto en el espacio de diseño $[x^L, x^U]$, $x_i \in Z \forall i \in I$, también llamado solución, representa los valores de los parámetros de diseño y define a un candidato. (Wortmann, 2018)



3. La expresión se podría leer de la manera siguiente: ¿Cuál es el valor mínimo de una función, en un espacio de números reales con n dimensiones, donde cada dimensión representa uno de los parámetros a optimizar delimitada por L y U , y donde el conjunto de soluciones está indexado con números enteros.

[Figura 3.1] Diagramas de (a) un espacio de diseño bidimensional con cruces que representan candidatos de diseño, (b) candidatos de diseño con una tercera dimensión que representa su desempeño, i.e., puntos en el fitness landscape⁴, (c) curvas topográficas un modelo sustituto que se aproxima al fitness landscape.

Un espacio de diseño (Wortmann, 2018) graficado con una dimensión adicional (para representar el desempeño) también se conoce en la literatura como *fitness landscape*⁴. Cuando se evalúa un modelo paramétrico con simulaciones de desempeño la forma del fitness landscape es, por lo general, desconocida. Cuando el *fitness landscape* tiene un sólo punto mínimo (o máximo), es una función convexa, a medida que el la función es más discontinua, plegada, o con quiebres abruptos (como una topografía accidentada) el problema de optimización es más complicado. [Figura 3.1]

3.2.2. Optimización de caja negra⁵

En un problema estándar de optimización matemática (Conn, Scheinberg, & Vicente, 2009), se busca en una función continuamente diferenciable el punto donde el valor de la primera derivada es cero, lo que da como resultado el valor de la función donde hay un mínimo o máximo local, no obstante hay problemas donde es imposible disponer de una función y/o sus derivadas en forma analítica. Para estos

4. Término originado en el campo de la biología evolutiva para representar la relación entre genotipo y éxito reproductivo en especies. El término *adaptive landscape* es también usado como sinónimo cuya traducción en español en biología evolutiva es paisaje adaptativo, sin embargo, se usará el anglicismo para evitar confusión por las connotaciones lingüísticas del concepto “adaptativo”

5. La optimización de caja negra, es también denominada optimización libre de derivadas, u optimización basada en simulaciones, cuyas traducciones al inglés son correspondientemente: *Black-box optimization*, *Derivative-Free Optimization*, y *Simulation-Based Optimization*. (Wortmann, 2017; 2018).

problemas puede usarse un tipo de optimización no-lineal llamado optimización sin derivadas (derivative-free optimization), donde en vez de modelar con una función el comportamiento del fenómeno estudiado, se obtienen muestras de la función iterativamente para llegar a un punto óptimo aproximado. Los métodos sin derivadas son menos precisos que los métodos por cálculo diferencial, sin embargo para muchas aplicaciones actuales (como en simulaciones donde la función objetivo no tiene una representación analítica explícita) sus resultados son aceptables.

La *optimización de caja negra* (Wortmann, 2017) busca resolver problemas que son computables pero no están disponibles en forma analítica. Un ejemplo de esto son las simulaciones numéricas (tratadas en el capítulo anterior) donde el problema, por ser no-lineal, no puede ser representado como una función analítica explícita. Este es un caso común (Nguyen et al., 2014; Wortmann, 2017; Conn et al., 2017; Diez et al., 2019;) por el creciente uso en las últimas décadas de simulaciones numéricas para la representación de sistemas complejos en arquitectura, ingenierías y ciencias. Nguyen et al. (2014) plantean tres fases para los estudios de optimización para la edificación basada en simulaciones: pre-procesamiento, corrida de optimización y post-procesamiento. En la tabla [Figura 3.2] se puntúan los pasos en cada fase.

[Figura 3.2] Tabla de fases principales en estudios realizados para la optimización basada en simulaciones en edificaciones planteada por Nguyen et al. (2014).

Fase	Tareas Principales
Pre-procesamiento	Formular el problema de optimización: -construcción computacional del modelo; -establecer funciones objetivo y restricciones; -seleccionar y establecer variables independientes y restricciones; -seleccionar un algoritmo de optimización apropiado y sus ajustes; -integrar el algoritmo de optimización y el algoritmo de simulación (opcional) -Descartar variables irrelevantes mediante un análisis de sensibilidad para reducir el espacio de búsqueda e incrementar la eficiencia de la optimización (opcional) -Crear un modelo sustituto para reducir el costo computacional de la optimización.
Corrida de optimización	Monitoreo de convergencia Control de criterios de conclusión Detección de errores o fallas en la simulación
Post-procesamiento	Interpretar resultados de optimización (opcional) Verificación y comparación del modelo sustituto con el modelo "real" (opcional) Realizar análisis de sensibilidad con los resultados Presentar Resultados

3.2.3. Algoritmos de optimización

Desde 1950 muchos algoritmos de optimización sin derivadas han sido propuestos, no hay una taxonomía acordada para estos algoritmos, pero Wortmann & Nannicini (2016; 217) citados en Wortmann (2018) proponen tres categorías: métodos metaheurísticos, búsqueda directa y métodos basados en modelos. Las tres características y algunos ejemplos serán tratados en las secciones siguientes.

3.2.3.1. Búsqueda directa

Los algoritmos de búsqueda directa (Wortman, 2018) son por lo general determinísticos y tienen una sólida fundamentación matemática. Hooke & Jeeves (1961) acuñaron el término búsqueda directa para describir la examinación secuencial de soluciones de prueba comparando cada solución con la mejor obtenida hasta ese momento junto con una estrategia para determinar cuál será la próxima solución de prueba. DIRECT es un algoritmo clásico (Wortman 2018) en esta categoría. El algoritmo divide el espacio de diseño en cajas y selecciona las cajas que contienen potencialmente el valor óptimo (con base en una aproximación de la constante de Lipschitz) que consecutivamente subdivide y selecciona en un número finito de iteraciones hasta encontrar un valor cercano al óptimo. Al igual que en (Wortmann, 2018b) en esta investigación se utiliza el algoritmo DIRECT de la biblioteca de código abierto NLOpt library 7.

3.2.3.2. Métodos metaheurísticos

Una metaheurística (Wortmann, 2017; 2018) es un proceso (o sub-rutina) que construye una heurística (estrategia que se utiliza para guiar el proceso de búsqueda) para un problema de optimización. Algunos de los métodos metaheurísticos más conocidos son templado simulado (SA)¹, algoritmos genéticos (GAs)², enjambre de partículas (PSO)³, estrategia evolutiva de adaptación de matriz de covarianza (CMA-ES)⁴, entre otros. Mientras son ampliamente usados por su simplicidad conceptual y facilidad de implementación tienen desventajas significativas como la falta de garantía de eficacia, y la alta cantidad de iteraciones necesarias para su convergencia en una solución aproximada. En las secciones a continuación se explicarán los tres tipos metaheurísticos utilizados en el caso de estudio.

3.2.3.2.1. Templado simulado⁵ (SA)

Adquiere su nombre (Henderson, Jacobson, & Johnson, 2003) del tratamiento térmico de recocido o templado⁵ donde un sólido cristalino es calentado y después enfriado lentamente para lograr una red cristalina regular con una integridad estructural superior. El algoritmo basa su comportamiento en este fenómeno termodinámico para la búsqueda de un mínimo global para la resolución de problemas de optimización discretos (y en menor medida problemas continuos). El plugin *Galapagos* incluido en *Grasshopper* (Wortmann, 2018) tiene la opción de utilizar SA para la resolución de problemas de optimización.

En cada iteración del algoritmo (Henderson et al., 2003) se generan dos valores (soluciones) de la función (la mejor solución actual y una nueva) que se comparan. Las soluciones que mejoran son siempre aceptadas, y sólo una fracción de las que no mejoran (inferiores) son aceptadas permitiendo que el algoritmo no se estanque en óptimos locales. La fracción de soluciones inferiores aceptada depende del parámetro de temperatura, que típicamente se reduce con cada iteración del

5. "Templado simulado" es la traducción del término utilizado en inglés "simulated annealing" que es una técnica en metalurgia donde se controlan los cambios de temperatura para lograr una estructura cristalina deseada. Otra traducción al español posible es recocido, que se refiere a la misma técnica.

algoritmo. La característica clave de este algoritmo es que permite escapar de óptimos locales al permitir la exploración de soluciones no óptimas. Para ver pseudocódigo y fundamentación matemática de SA ver (Henderson et al., 2003).

3.2.3.2. Algoritmos genéticos (GAs)

Entre los métodos metaheurísticos (Nguyen et al., 2014; Wortmann 2018), los algoritmos genéticos son los más usados y populares en arquitectura e ingenierías. Son un método (Coley, 1999) de optimización numérica inspirados en selección natural y genética biológica, desarrollado esencialmente por John Holland en la década de 1960. Un algoritmo típico consiste en:

- a) un conjunto (o población) de soluciones aleatorias al problema;
- b) un criterio para determinar qué tan buena es la solución;
- c) un método de recombinación de parámetros de las mejores soluciones para formar nuevas soluciones que las de las poblaciones anteriores; y
- d) un operador de mutación para evitar la pérdida permanente de diversidad en la población de soluciones.

Los algoritmos genéticos (Coley, 1999) comienzan con una población (generación 0) de soluciones aleatorias distribuidas en el espacio de búsqueda. El algoritmo usa tres operadores: selección, cruce de genes y mutación para dirigir la población a un óptimo global. Mediante la selección se eligen las soluciones con mejor cumplimiento del criterio y se les asigna una mayor probabilidad de pasar sus valores de los parámetros (genes) a la siguiente generación. El cruce genético intercambia hilos de información entre soluciones (valores de parámetros) en un locus dado. La mutación genera cambios aleatorios a las variables (del espacio de búsqueda) generalmente en porcentajes pequeños. Ejecutados estos tres operadores se obtiene una nueva generación, y el proceso de selección, cruce de genes y mutación se repite n veces o hasta satisfacer un criterio de convergencia. Para la resolución de diferentes problemas se debe decidir el método para codificar los parámetros, la sub-rutina para intercambiar información en el cruce genético, el tamaño de población (con valores típicos entre 20 y 200), cómo realizar la mutación y el criterio de terminación. Para la descripción matemática y computacional con ejemplos ver (Coley, 1999).

3.2.3.2.3. Enjambre de partículas (PSO)⁶

La optimización de enjambre de partículas⁶ (Wetter & Wright, 2004; Diez & al., 2019) engloba una familia de algoritmos probabilísticos basados en poblaciones, fueron propuestos por primera vez por Eberhart & Kennedy en 1995 para la resolución de problemas de optimización global. El comportamiento del PSO está basado en el comportamiento social de parvadas de aves o cardúmenes de peces.

6. Optimización de enjambre de partículas es la traducción propuesta para el término "particle-swarm optimization" abreviado como PSO.

En PSO (Khanesar, Tavakoli, Teshnehlab, & Shoorehdeli, 2009) cada partícula dentro del enjambre es una solución representada por un vector en el espacio de búsqueda. La partícula tiene un segundo vector asignado que determina su próximo movimiento (llamado vector velocidad). Cada partícula actualiza su vector velocidad con base en tres valores:

- a) la velocidad en ese momento;
- b) la mejor solución explorada por la partícula hasta ese momento; y
- c) la mejor solución explorada por todas las partículas.

Asumiendo que el espacio de búsqueda tiene d dimensiones, y el enjambre está compuesto por n partículas con índice i , la partícula se representa por el vector posición X_i , y su velocidad por un vector V_i . La iteración es representada por t . La distribución de las partículas sobre el espacio de búsqueda d -dimensional puede ser regular o aleatoria. En una iteración dada t se define un nuevo vector velocidad sumando tres vectores:

- a) el vector velocidad de la partícula en la iteración anterior multiplicado por una constante w que representa el peso de la inercia (se establece un borde superior a la velocidad que no se puede superar);
- b) un vector velocidad en dirección a la mejor solución explorada por esa partícula en iteraciones anteriores, multiplicado por una constante c_1 y una variable aleatoria (con una distribución uniforme entre 0 y 1) ϕ_1 ; y
- c) un vector velocidad en dirección a la mejor solución explorada por todas las partículas en iteraciones anteriores, multiplicado por una constante c_2 y una variable aleatoria (con una distribución uniforme entre 0 y 1) ϕ_2 .

La posición de la partícula X_i en tiempo $t+1$ es la suma de la posición de la misma partícula en la iteración anterior y el vector velocidad calculado. El proceso se repite n veces o hasta satisfacer un criterio de convergencia. Para una descripción matemática completa, con fórmulas y variaciones del algoritmo ver (Khanesar et al., 2009).

3.2.3.3. Modelos sustitutos (RBFOpt)

Los métodos de optimización basados en modelos (Gutmann, 2001; Koziel & Bandler 2007; Koziel & Leifsson, 2013; Nguyen et al., 2014; Wortmann, 2017b; 2018b; Diez et al., 2019) usan las soluciones evaluadas para construir un modelo (llamado meta-modelo o modelo sustituto) de la función objetivo. Los modelos sustitutos no sólo ayudan en el proceso de optimización, sino que también dan un estimado de candidatos de diseño no explorados con un grado razonable de precisión. Este método ha demostrado ser particularmente efectivo para problemas cuyo costo

computacional de evaluación es alto, por ejemplo en simulaciones de elemento finito, iluminación y dinámica de fluidos. Dada su capacidad para modelar espacios de diseño complejos. Las funciones de Kriging y de base radial han resultado ser particularmente adecuadas para problemas basados en simulación en ingeniería y arquitectura.

El meta-modelo (Gutmann, 2001; Koziel & Leifsson, 2013; Nguyen et al., 2014) guía la búsqueda y se actualiza durante el proceso de optimización. Existen diferentes métodos de interpolación de datos para construir el modelo sustituto, uno de los primeros fue Efficient Global Optimization (EGO) por Johnes et al. en 1998. Las funciones de base radial (Buhmann & Fletcher, 1996) estudiadas amplia y prolíficamente por Mike Powell desde 1966, han demostrado una mayor precisión para modelar la curvatura de la función subyacente.

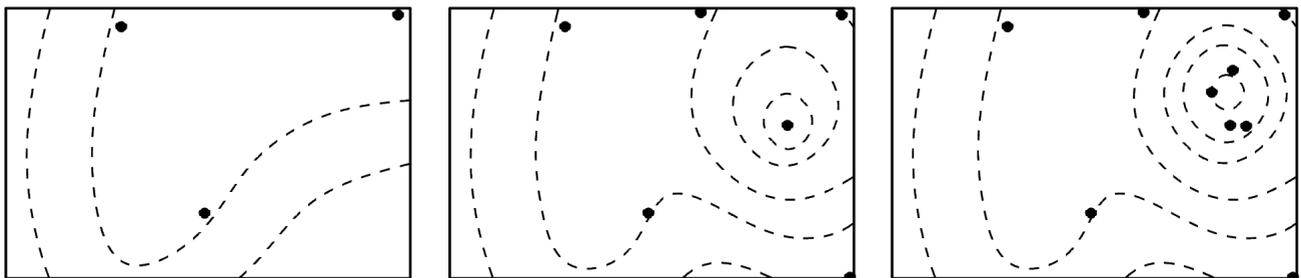
Establecer un modelo sustituto (Nguyen & al., 2014) implica tres acciones principales:

- a) evaluación de una muestra de ubicaciones en el espacio de búsqueda, que constituye un base de datos inicial para entrenar al meta-modelo;
- b) construcción del modelo sustituto con base en la interpolación de las soluciones evaluadas seleccionando un método de interpolación de datos adecuado; y
- c) validación del modelo antes de ser utilizado como sustituto de la función original.

Este modelo (Wortmann 2017) es el punto de partida, para comenzar el proceso iterativo de refinamiento del modelo en los siguientes pasos:

- a) selección de un punto prometedor (con base en el modelo existente) dentro del espacio de búsqueda;
- b) evaluación del punto mediante simulación numérica; y
- c) actualización del meta-modelo con la información del punto evaluado.

Figura 3.3: Diagrama de tres iteraciones de un algoritmo global RBFOpt. Las líneas punteadas representan los niveles topográficos del espacio de diseño aproximado mediante la interpolación de una función de base radial en puntos evaluados del espacio de diseño. Imagen de Wortmann (2018).



De esta manera se incrementa en cada iteración la precisión del modelo. El plugin Opossum creado por Wortmann (2017) utiliza el método RBFOpt 13, que es una biblioteca de código abierto de algoritmos de optimización basados en modelos sustitutos con funciones de base radial. Para ver el fundamento computacional de RBFOpt ver (Gutmann, 2001; Koziel & al., 2007; Koziel & Leifsson, 2013; Diez et al, 2019), para ver la descripción matemática de las funciones de base radial ver (Buhmann & Fletcher 1996; Powell, 2007).

3.2.3.5. Optimización multi-objetivo y frente de Pareto

Los casos tratados hasta este punto pertenecen a la categoría de optimización de objetivo singular (con una sola función objetivo), sin embargo el diseño implica optimizar con respecto a múltiples criterios. Esto es particularmente interesante para casos donde hay una relación inversa entre lo que se busca optimizar, e.g., costo vs. tiempo; masa vs. estabilidad; o iluminación natural vs. ganancia térmica. [Figura 3.4]

En problemas de diseño para el mundo real (Nguyen et al., 2014) se busca resolver problemas de diseño con varios criterios que se contraponen simultáneamente, tales como mínimo consumo de energía vs. máximo confort térmico, o mínimo costo de construcción vs. máxima estabilidad, por lo tanto la optimización multi-objetivo es en muchos casos más relevante que la de objetivo único. El conjunto (o frente) de Pareto⁷ (Wortmann, 2018) es un método utilizado para visualizar problemas de optimización multi-objetivo. Se puede formular el problema de optimización multi-objetivo como la optimización de un vector de diferentes funciones objetivo:

$$\min \{F(x)=[f_1(x),f_2(x),\dots,f_k(x)]\}$$

En una gráfica n-dimensional donde cada eje representa cada objetivo (López, Zapotecas, & Coello, 2009; Wortmann, 2018), el frente de Pareto es el conjunto de soluciones no-dominables⁸. El frente de Pareto muestra las compensaciones o negociaciones entre objetivos que se contraponen, e.g. para un valor establecido de costo la máxima estabilidad posible tiene un valor, a medida que el valor establecido de costo disminuye, la máxima estabilidad posible también decrece. Los algoritmos de optimización multi-objetivo buscan aproximar el frente de Pareto, que puede realizarse (Wortmann 2017) tanto con algoritmos metaheurísticos como con modelos sustitutos.

Cuando se grafican las soluciones (López, Zapotecas, & Coello, 2009) en el espacio de búsqueda (los ejes son las variables de diseño) podemos identificar las soluciones no-dominables (azul) que son el conjunto óptimo de Pareto. Cuando se grafican las soluciones en un espacio de funciones objetivo, la curva que conecta a todos los puntos del conjunto de Pareto es llamada frente de Pareto.

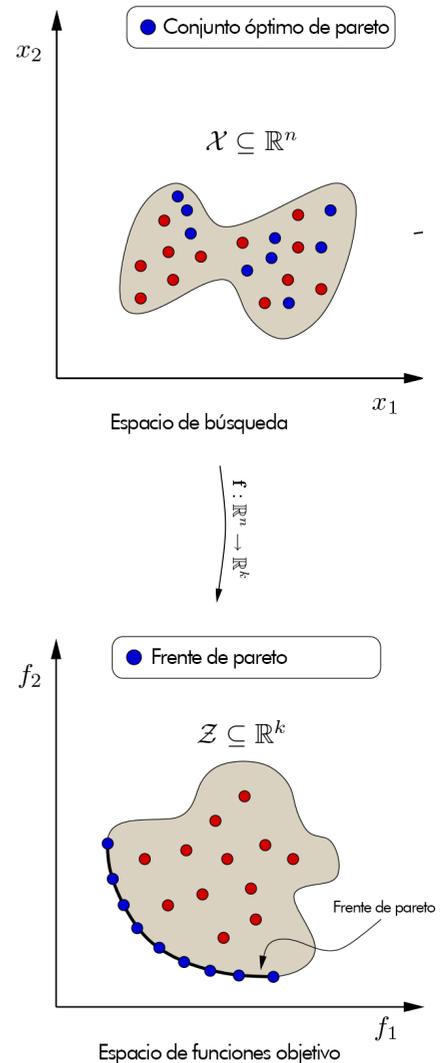


Figura 3.4: Ilustración del concepto del conjunto óptimo de Pareto y su representación en el espacio de las funciones objetivo. Los puntos oscuros representan vectores que pertenecen al conjunto óptimo. En el espacio de búsqueda (o espacio de diseño estos son llamados vectores de diseño con optimalidad de Pareto, cuando estos son representados en el espacio de las funciones objetivo, a estos se les llama frente de Pareto. Imagen de López, Zapotecas, & Coello (2009).

7. El frente de Pareto en un problema con dos objetivos es representado por una curva y en un problema de tres objetivos por una superficie. (López, Zapotecas, & Coello, 2009)

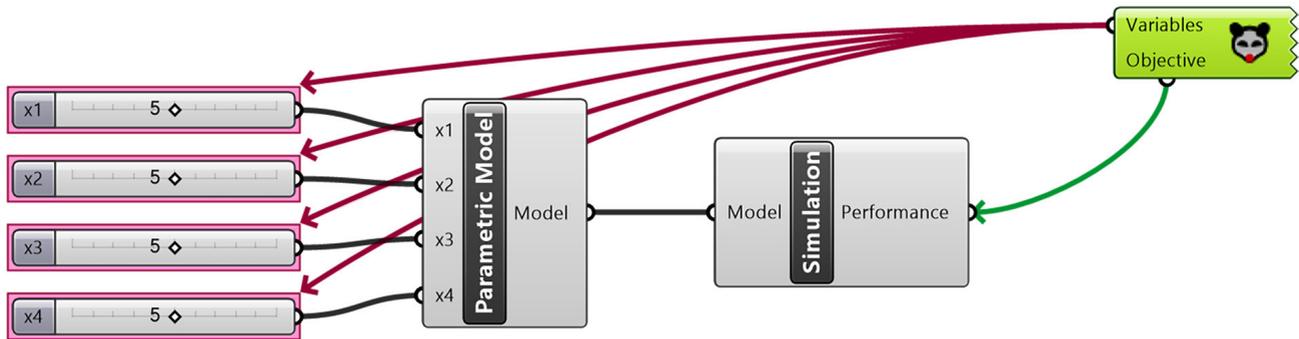
8. Para una solución no-dominable es imposible mejorar el valor de un objetivo sin provocar pérdidas en otro(s) (López, Zapotecas, & Coello, 2009; Wortmann, 2018).

3.2.5. Herramientas de optimización para el diseño arquitectónico

[Figura 3.5] Definición genérica para problema de optimización en grasshopper: primero se colocan los parámetros o variables del espacio de búsqueda, después el modelo paramétrico seguido de la simulación de desempeño que realiza la evaluación de un punto en la función objetivo. El último comando añadido contiene el algoritmo de optimización, que varía los parámetros, mide el desempeño y encuentra un resultado óptimo. Imagen de Wortmann (2018).

[Figura 3.6] Tabla de plugins para grasshopper, y los algoritmos de optimización que utilizan.

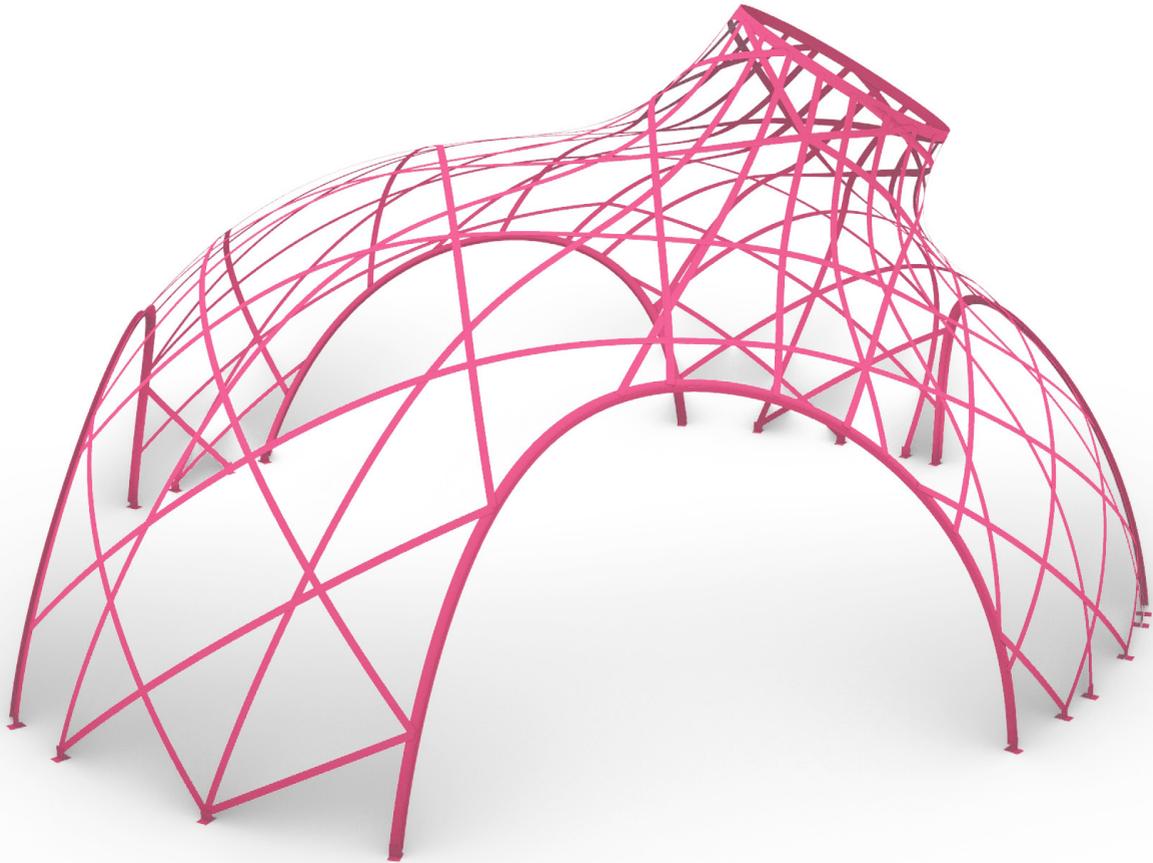
Existen tres herramientas (Wortmann 2018;) para el diseño arquitectónico que están disponibles al público y que integran simulaciones de desempeño con herramientas de optimización de caja negra dentro de la misma interfaz gráfica de usuario: Grasshopper, Dynamo Studio y Design Builder. Para esta investigación se ha utilizado Grasshopper y los plugins disponibles mencionados en cada sección. Existen plugins para simulaciones físicas, estructurales, análisis energético y de iluminación entre otros. Grasshopper incluye el plugin Galapagos para realizar optimización con algoritmos genéticos y templado simulado. Otros plugins similares son Goat, Octopus, Silvereye, Opossum, Nelder-Mead Optimization y Design Space Exploration.



Plugin	Autores	Detalles
Goat	Flöry et al., 2012	NLopt: biblioteca de optimización que incluye los algoritmos: DIRECT COYBLA BOBYQA SUBPLEX CRS2
Octopus	Vierlinger, 2012	Para optimización multi-objetivo con : Algoritmos Genéticos SPEA-2 HypeE
Silvereye	Cichocka et al., 2016	Optimización con meta-modelos con la biblioteca RBFOpt
Opossum	Wortmann, 2016	Optimización con meta-modelos con la biblioteca RBFOpt
Galapagos	Rutten, 2010	GA y SA
Goldfish		Optimización multi-objetivo con PSO

3.3.Caso de estudio: Cubierta para “Hostal en Playa del Carmen”

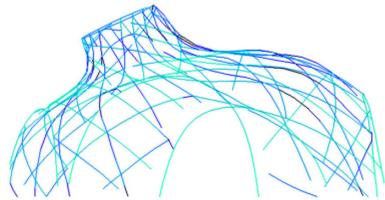
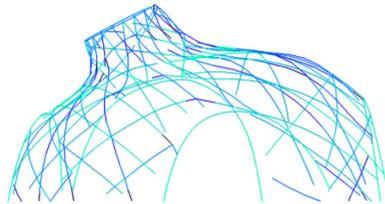
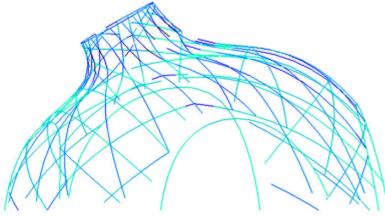
Para la empresa Servicios Inmobiliarios Ávila S.A. el autor realizó un proyecto arquitectónico utilizando el Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa como sistema estructural de la cubierta de un hostal en Playa del Carmen. En el marco de los talleres de la conferencia internacional ACADIA 2018 tuvo lugar un taller de optimización impartido por Thomas Wortmann y Radek Grymin, donde cada asistente resolvió problemas de optimización en diferentes áreas relacionadas con la arquitectura. El proyecto del hostal se utilizó como caso de estudio para hacer un comparativo de algoritmos de optimización en grasshopper, el proceco se muestra a continuación.



3.3.1.Preprocesamiento

Para realizar un proceso de optimización (Nguyen et al. 2014) la primera fase implica un pre-procesamiento, donde se realiza el modelo del objeto o sistema a optimizar, junto con su parametrización y simulación correspondientes. Se utilizó Kangaroo Physics para realizar la simulación, para ver una descripción detallada ver capítulo 2. Se utilizaron las propiedades mecánicas del acero de a-50. La

[Figura 3.7] CRGFA para la cubierta del hostal: entramado de barras, bordes no-apoyados y uniones con la cimentación.



simulación muestra la deformación de la estructura generada por las fuerzas gravitacionales producto de la masa propia. En la imagen se muestran secciones de los elementos estructurales que hiciera explícitas las iteraciones 0, 50 y 100 de la simulación. El proceso de cómputo se realizó en un equipo de cómputo Asus Laptop fx503v con sistema operativo Windows 10, procesador Intel Core i5-7300 CPU @ 2.50GHz, donde se realizaron 2000 iteraciones) del comportamiento de la estructura tomó 1.54s.

3.3.2. Problema con una función objetivo: evaluación comparativa de cuatro algoritmos

3.3.2.1. Planteamiento

Se usará la notación encontrada en (Nguyen et al., 2017; Wortmann, 2017; 2017b; 2018; 2018b) considerada por el autor, aunque existen otras notaciones como las utilizadas por Diez et al., (2019). En el primer caso se abordará el problema de optimización con un objetivo único. Para el segundo caso se abordará como problema de optimización multiobjetivo. Los objetivos a optimizar serán:

- a) Masa total de la estructura (minimizar)
- b) Desplazamiento total de los nodos con respecto a su posición meta (minimizar)

Los parámetros de diseño (variables que definen el espacio de búsqueda) son las dimensiones de base y altura de las secciones rectangulares de las barras azul, rojo y magenta (arm). Las familias de barras de colores diferentes en la figura X!!!. El espacio de búsqueda está delimitado por:

$$\{x: x \in [xL, xU] \subseteq \mathbb{R}^6\}$$

Donde xL y xU son los vectores que delimitan el espacio de búsqueda

$$\{xL = (0.01, 0.003, 0.01, 0.003, 0.01, 0.003)\}$$

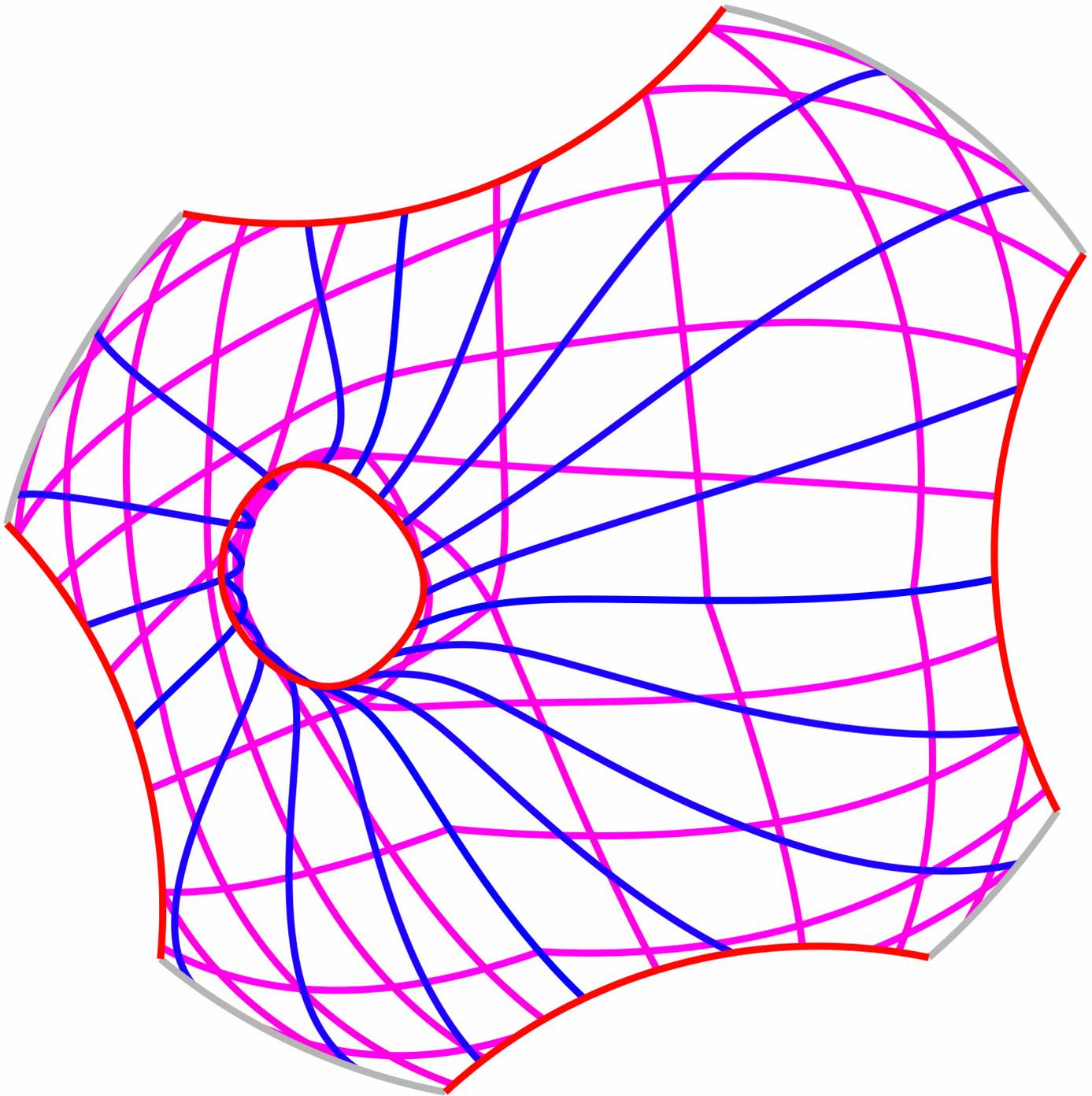
$$\{xU = (0.15, 0.02, 0.15, 0.02, 0.15, 0.02)\}$$

Se utilizará una multiplicación ponderada para unir las dos funciones objetivo:

$$\min \{f(x) = [f_1(x)]^w \cdot [f_2(x)]^{1-w}\}, w \in (0,1), x \in [x^L, x^U] \subseteq \mathbb{R}^n \} (OPT)$$

donde "f(x)" es la función objetivo resultado del producto ponderado de la función de masa

[Figura 3.8] Iteraciones 0, 50 y 100 de simulación de la estructura mostrando deformaciones significativas. Los colores representan el esfuerzo flexionante relativo de los componentes donde el azul oscuro corresponde a una flexión mayor y el verde a una flexión menor.



" $f_1(x)$ " y la función de desplazamiento " $f_2(x)$ "; w es el valor de ponderación exponencial, en este caso se utilizó $w = 0.3$ para masa y por lo tanto $1-w = 0.7$ para desplazamiento, esto significa que se le asigna una prioridad mayor a los desplazamientos que a las masas; $x \in [x^l, x^u] \subseteq \mathbb{R}^n$ es el espacio de búsqueda delimitado que es un subconjunto de un espacio vectorial n -dimensional real, si tenemos 6 variables de diseño, entonces $n=6$.

[Figura 3.9] Planta de cascarón con tres familias de barras: Azul, Rojo y Magenta. A cada familia corresponde una sección diferente cuyas dimensiones de base y altura son los parámetros de optimización.

Para obtener los valores de las funciones $f_1(x)$ y $f_2(x)$ fueron utilizadas las siguientes ecuaciones:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n l_i \cdot x_b \cdot x_h \cdot d$$

donde " l_i " es la longitud del elemento estructural con índice " i "; " x_b " es la dimensión de la base de su sección; " x_h " es la dimensión de la altura de su sección; y " d " es la densidad del material usado (acero estructural a-50: $d = 7861.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); y

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n | \Delta x_i |$$

donde " Δx_i " es el desplazamiento del nodo con índice " i " con respecto a su posición sin cargas. En esta ecuación se suman los valores absolutos de todos los desplazamientos de los nodos.

El problema se puede enunciar lingüísticamente como: *¿qué dimensiones en las secciones de las tres familias de barras lograrán la menor masa total de la estructura con la menor deformación posible, cuando se prioriza la deformación en un 70% y la masa en 30%?*

En el método de simulación planteado en este trabajo de investigación no se contemplan los efectos en componentes estructurales de la fuerza cortante y la torsión. El efecto diafragma que podría tener el sistema de panelización de la envolvente es descartado y se toma como asunción que el comportamiento a flexión de los elementos lineales es regido por el momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje x, dado que las deformaciones de las barras geodésicas en las superficies de doble curvatura tienen una deformación mayor tangente a la superficie, y las deformaciones por cargas en otros sentidos tienden a ser mucho menores.

3.3.2.2. Resolución

Para resolver el problema de optimización se usaron cuatro algoritmos de optimización de caja negra [Figura 3.10]. La definición general en grasshopper para para estos componentes tiene las siguientes partes:

- Parámetros: 6 valores de base y altura de sección de las barras de la estructura.
- Modelo paramétrico: características geométricas y de material y carga para insertar a la simulación.
- Simulación: algoritmo iterativo para encontrar el equilibrio de fuerzas y la deformación.
- Componente de simulación: algoritmo que varía los parámetros y mide el desempeño con alguna estrategia para encontrar la mejor solución.

Se utilizaron los parámetros predeterminados de cada algoritmo, con excepción del tamaño de población en GA que se redujo a 20. Con un script de python se registraron los valores de las 400 evaluaciones realizadas con cada algoritmo.

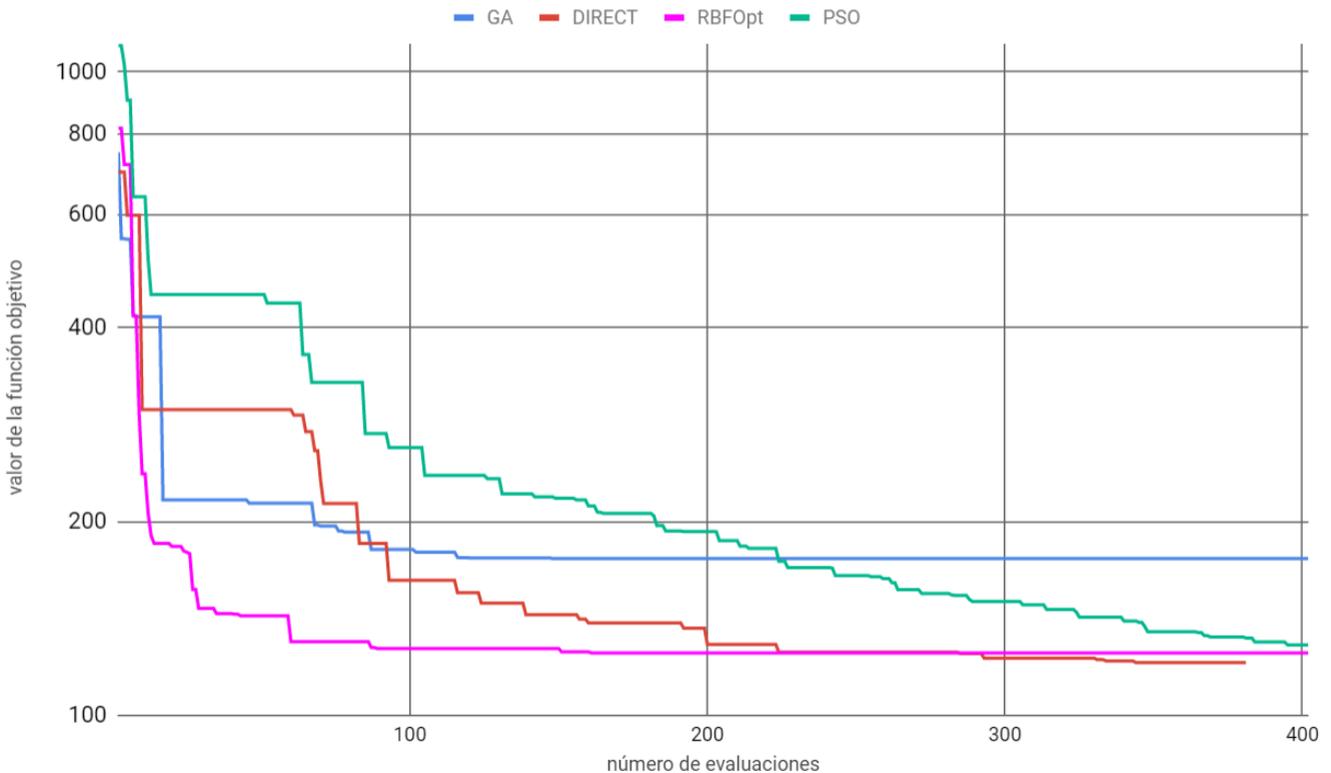
Algoritmo	Plug-in
GA	Galapagos
DIRECT	Goat
PSO	Silvereye
RBFOpt	Opossum

[Figura 3.10] algoritmos de optimización utilizados con su respectivo plug-in para grasshopper.

3.3.2.3. Resultados y evaluación comparativa

La gráfica de convergencia [Figura 3.11] compara los cuatro algoritmos utilizados, graficando el valor de la función objetivo contra el número de evaluaciones. El valor

Valor de la función objetivo vs número de evaluaciones



inicial promedio de los cuatro algoritmos fue $f(x)=841$, el mejor algoritmo logró reducir ese valor hasta $f(x)=120$, es decir se redujo el valor de la función objetivo en 85.7%. A pesar de que el algoritmo RBFOpt demuestra una convergencia rápida en comparación con los otros algoritmos, DIRECT lo superó alrededor de la evaluación número 250, y fue el mejor algoritmo de todos. El algoritmo GA tiene un buen comienzo pero se queda estancado en un óptimo local alcanzando un valor de $f(x)=175$. PSO tiene una convergencia más lenta, pero obtiene un buen resultado (muy cercano al óptimo global) para la evaluación 400.

[Figura 3.11] Gráfica: Valor de la función objetivo vs. número de evaluaciones. Evaluación comparativa para el problema de optimización con cuatro algoritmos de optimización en 400 evaluaciones. La variable independiente es el número de evaluaciones y la dependiente el valor de la función objetivo para cada evaluación, representada en escala logarítmica.

3.3.2.4. Discusión

Los problemas de optimización (Wortmann 2017) tienden a dar funciones objetivo multimodales e irregulares, por lo que algoritmos globales tales como DIRECT, RBFOpt y algunos metaheurísticos tienen mayor probabilidad de dar los mejores resultados. RBFOpt es particularmente adecuado cuando el número de evaluaciones es reducido. En la evaluación realizada se observa que RBFOpt tuvo el mejor resultado desde la evaluación 9 hasta la evaluación 287, donde fue

superado por DIRECT. La evaluación también muestra que para búsqueda local DIRECT es más adecuado, especialmente cuando el número de evaluaciones es mayor. RBFOpt tiene dificultades para búsqueda local.

En las evaluaciones comparativas realizadas por Wetter & Wright (2004), Nguyen et al. (2014), y Wortman et al (2017), se concluye que la naturaleza en los problemas en arquitectura basados en simulaciones (problemas con muchas variables, restricciones, parámetros discontinuos e incertidumbre del modelo) los métodos globales son mejores, a diferencia de los de búsqueda local, también se concluye que GA tiene el peor desempeño por lo general. Los métodos basados en modelos sustitutos tienen un buen desempeño sobre todo para problemas donde es factible realizar un número reducido de evaluaciones.

3.3.3. Problema multiobjetivo: frente de Pareto con PSO

3.3.3.1. Planteamiento

El segundo caso de estudio explora el mismo problema de optimización de masa total y desplazamiento de nodos. Ahora el problema se aborda como optimización multiobjetivo mediante la búsqueda del conjunto de Pareto. Tenemos dos funciones objetivo en este problema: la función de masa total y la función de desplazamiento de nodos.

$$\min \{f(x) = [f_1(x), f_2(x)], w \in (0,1), x \in [x^L, x^U] \subseteq R^n \}$$

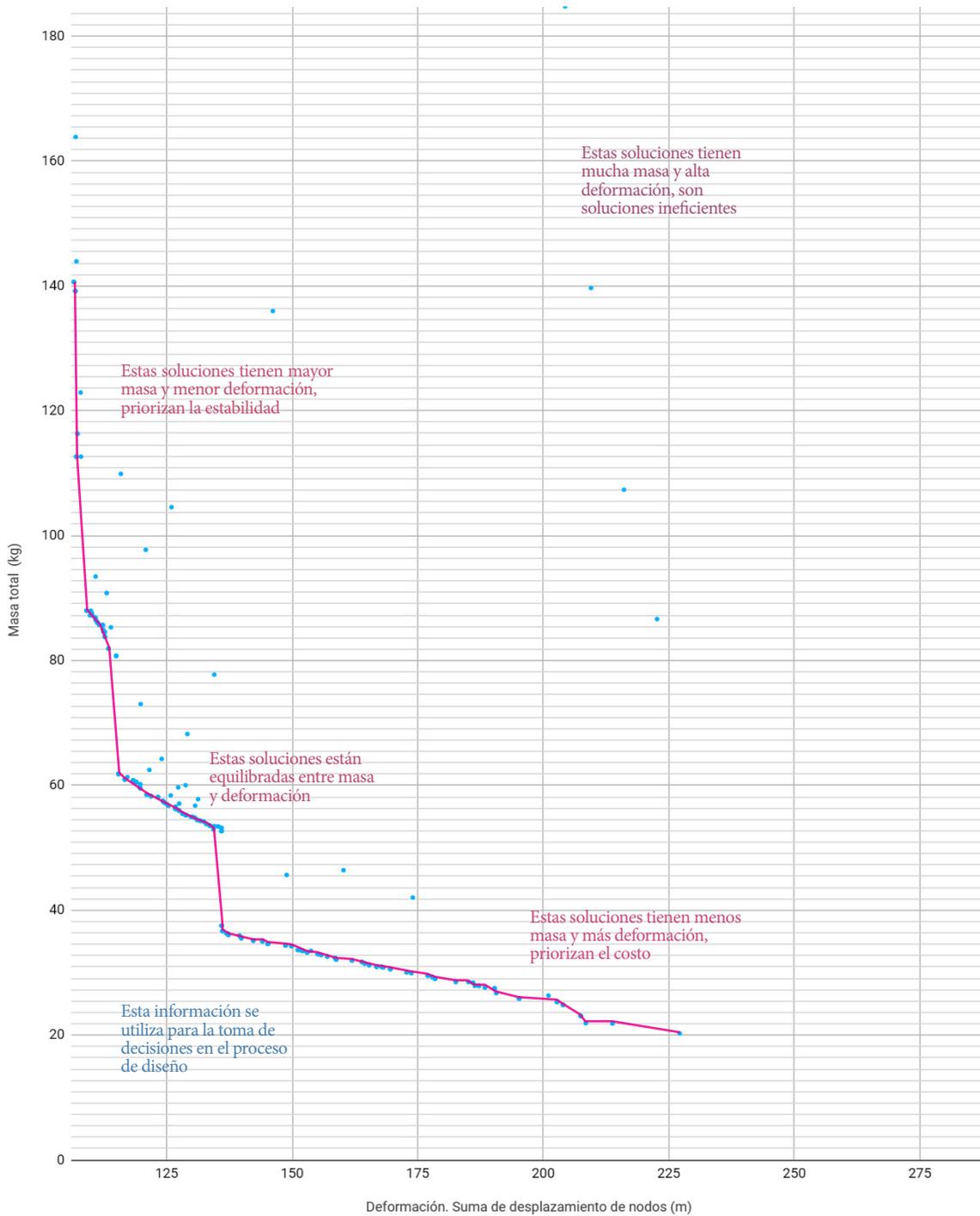
En este caso no se utiliza una multiplicación ponderada, sino que se busca el conjunto de soluciones no-dominables, donde es imposible mejorar el valor de un objetivo sin perjudicar el valor del otro objetivo.

3.3.3.2. Resolución

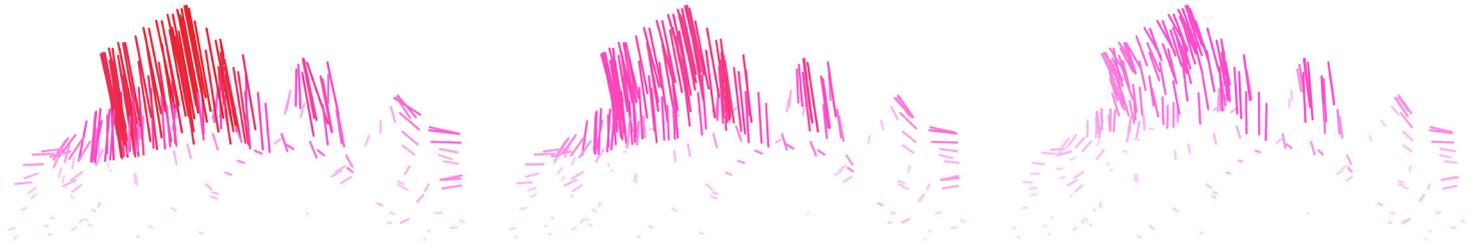
Se utilizó el plugin *goldfish* que es un optimizador multiobjetivo que utiliza un algoritmo PSO. *Óctopus* es otra herramienta disponible para optimización multiobjetivo que utiliza un algoritmo GA, pero se optó por *goldfish* por su interfaz interactiva. Se realizaron 5000 evaluaciones de la función objetivo en poblaciones de 100 partículas. El valor "w" de inercia establecido fue de 0.4, el factor de mutación aleatoria fue de 0.6. Los demás parámetros del algoritmo de optimización fueron conservados en valores predeterminados.

En la gráfica se muestran las soluciones del frente de Pareto. Hay una relación entre masa total y desplazamiento, donde a mayor masa menores los desplazamientos de las soluciones óptimas. El frente de Pareto nos da una gran diversidad de soluciones óptimas, a la izquierda las que le dan prioridad a la función objetivo de desplazamiento y a la derecha las que le dan prioridad a la masa (también se muestran otros puntos que no pertenecen al frente de Pareto que representan soluciones que tienen un peor desempeño en ambos objetivos).

Frente de Pareto de optimización de masa y desplazamiento



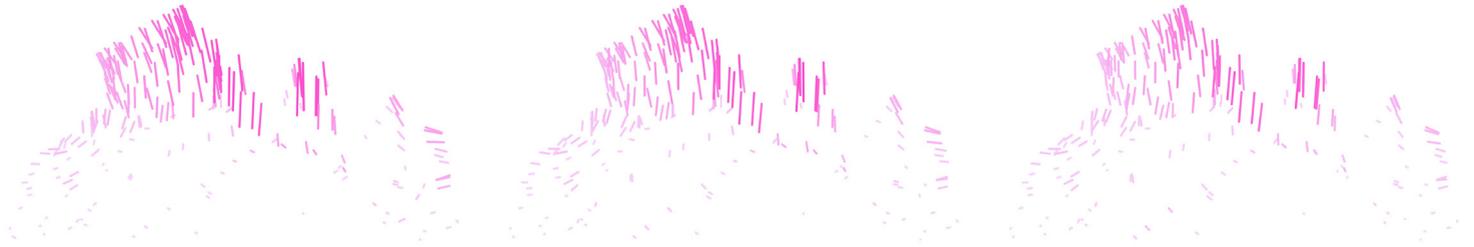
[Figura 3.12] Frente de Pareto graficado en el espacio de las funciones objetivo de masa y deformación. Los puntos cian representan algunas de las mejores soluciones. La línea magenta une los puntos del "conjunto óptimo de Pareto" para formar el "frente de Pareto". Todos los puntos atravesados por la línea magenta son soluciones óptimas, el primero punto óptimo de arriba a la izquierda prioriza la disminución de la deformación y tiene una masa alta, el último punto abajo a la derecha tiene menos masa pero mayor deformación. Los puntos más cerca del origen son más equilibrados respecto a masa y estabilidad.



3.3.3.3. Discusión

El plugin Goldfish tiene una interfaz interactiva, donde de la gráfica del frente de Pareto se pueden seleccionar soluciones y asignar el valor de los parámetros x al modelo paramétrico. Las imágenes en la figura 3.13 representan el desplazamiento de los nodos en una proyección lateral. La línea representa el vector de desplazamiento y el color es proporcional a la magnitud (rosa claro corresponde a un desplazamiento menor y rojo oscuro corresponde a uno mayor). Las soluciones mostradas representan algunos miembros del frente de Pareto. Cada una de estas soluciones representa una solución no dominable, es decir, entre muchas opciones exploradas, unas que se inclinan más a la optimización de masa y otras a la optimización de estabilidad. La primera representa una solución con mayor masa y menor desplazamiento, y a medida que avanzan tiene menor masa y mayor desplazamiento. Con esta información quien diseña puede comprender mejor la relación entre variables y desempeño del objeto diseñado para tomar una solución. Sabemos que la primera solución es la más costosa (por la cantidad de material necesaria para construirla) y también la más estable, sin embargo soluciones subsecuentes como la segunda y la tercera, tienen estabilidades similares, y requieren casi la mitad del material de construcción. Las últimas soluciones no son factibles porque superan el umbral de deformación (o estado límite de servicio) pero nos ayudan a comprender la relación entre costo y máxima estabilidad posible.

Se observó que el espesor de las barras tiene un efecto mayor (en contraste con el ancho) en el desplazamiento de los nodos, dado que su efecto en el momento de inercia de la sección es mayor. Por otro lado, tanto el ancho como el espesor tienen un efecto idéntico en la masa de la barra. Estas dos relaciones tuvieron como efecto en el proceso de optimización anchos menores y espesores mayores. La simulación mecánica no contempla los efectos por fuerza cortante y torsión, que muy probablemente cuando sean considerados tendrán un efecto en las soluciones óptimas que deberá ser explorado en investigaciones posteriores.



3.3.4. Conclusiones de optimización

La literatura en optimización recalca que ciertos métodos y algoritmos resuelven mejor diferentes problemas, sin embargo para el tipo de problemas que se presentan en la arquitectura (Wetter & Wright, 2004; Nguyen et al., 2014; Wortman et al 2017) los métodos determinísticos y los métodos basados en modelos son mejores para la resolución de problemas de optimización. La evaluación comparativa entre algoritmos de optimización realizada aquí es congruente con pruebas similares.

Los resultados de los problemas de optimización son susceptibles a cómo se construye el modelo de simulación como el planteamiento del problema de optimización. Un modelo más detallado (e.g. un modelo de elemento finito) puede dar resultados más precisos tanto para el comportamiento mecánico como para el problema de optimización, no obstante, incluso cuando la simulación es de alta fidelidad, los parámetros de diseño en el mundo real están sujetos a la incertidumbre, ya sea en el proceso de fabricación, en su uso o en los efectos ambientales a los que el objeto diseñado será sometido. Para un problema de optimización donde el valor óptimo es sensible a perturbaciones en los parámetros de diseño (Deb & Gupta, 2005), desde un punto de vista práctico, es mejor hacer énfasis en la búsqueda de una solución robusta, i.e., una solución menos sensible a perturbaciones en las variables provocadas por el error o la incertidumbre. Métodos de búsqueda de soluciones óptimas robustas deberán ser estudiados posteriormente.

El planteamiento de Wortmann (2017; 2017b; 2018; 2018b) respecto al área de interacción entre optimización matemática y diseño propone una evolución paradigmática, que lejos de plantear la automatización y cuantificación de los procesos de diseño, presenta un modo de trabajo donde la reflexión es asistida por conocimientos y herramientas de otras disciplinas, permitiendo el entendimiento profundo de fenómenos complejos como punto de partida para el diseño.

[Figura 3.13] Conjunto de soluciones óptimas pertenecientes al frente de Pareto. Proyección lateral de los desplazamientos de los nodos, rosa claro indica menor desplazamiento y rojo obscuro, mayor. La línea representa el vector desplazamiento de cada nodo, el color representa la magnitud. Los seis modelos representan soluciones óptimas con diferentes ponderaciones para las funciones objetivo; la primera representa la solución con menor costo de producción y mayores deformaciones, y la sexta el mayor costo de producción con las menores deformaciones. Dicho de otro modo, la primera solución asigna una prioridad al objetivo de minimizar la masa, y la sexta da prioridad a minimizar las deformaciones. Las soluciones intermedias van asignando valores diferentes gradualmente.

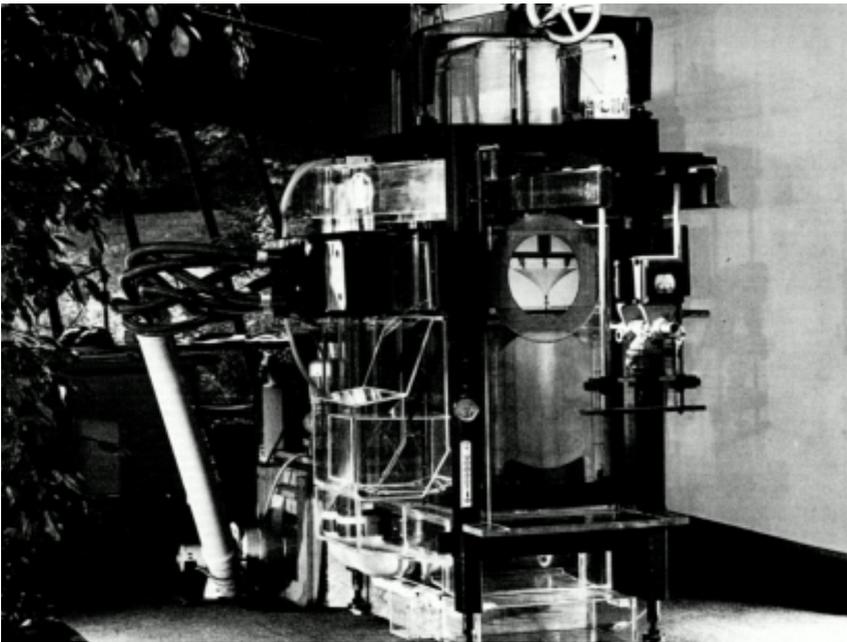
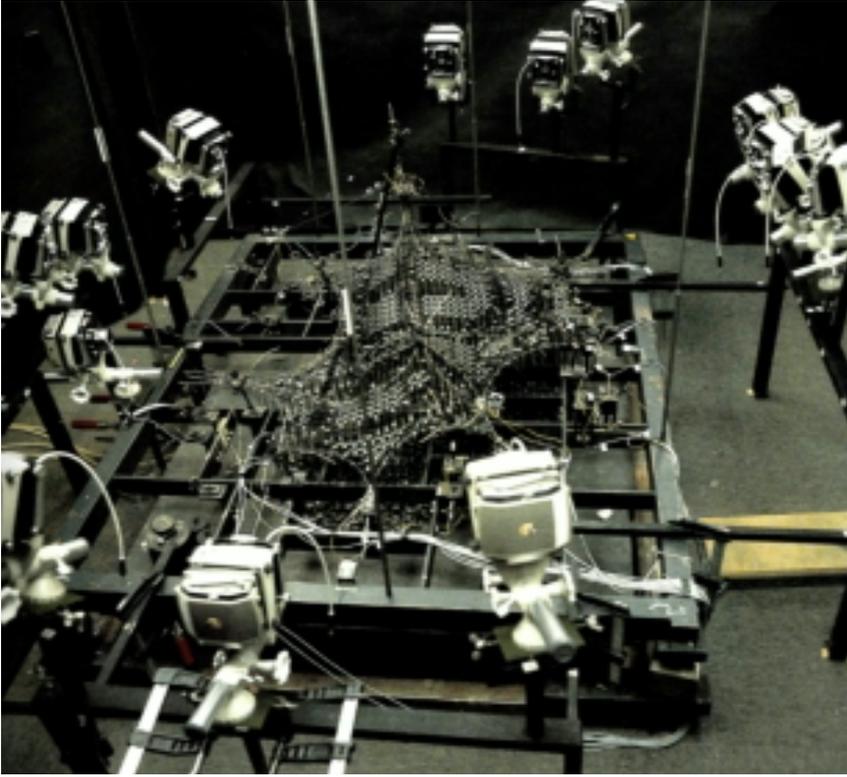
La optimización técnica aquí ejemplificada requiere de un cuerpo de conocimiento y métodos robustos para un proceso que se disecciona a continuación:

- a) reducción de un fenómeno material en un conjunto de componentes medibles instrumentalmente,
- b) representación de las relaciones entre estos componentes mediante un modelo matemático y su respectiva simulación numérica,
- c) establecimiento de un criterio de optimalidad justificado axiológicamente y expresado en lenguaje lógico-matemático, Y
- d) reconversión del conjunto de resultados numéricos entregado por el algoritmo de optimización para informar el proceso de decisiones técnicas.

Las partes del proceso de optimización evidencian cómo lo lógico matemático se funde con lo subjetivo, lo indeterminado y lo complejo. El instrumento de medición opera dentro del marco teórico en que fue conceptualizado, es la materialización de operaciones cognitivas y tiene inscrito en sí el procesamiento de información dentro de un paradigma epistémico. La multiplicidad de modelos para representar la flexión-estabilidad imposibilita la afirmación de un modelo absoluto. Mientras más investigado el fenómeno, mayor cantidad de variantes y alternativas surgen, que en vez de clarificar un entendimiento único de un fenómeno, posibilitan una visión multidimensional. El criterio de optimalidad se enuncia desde la subjetividad, desde el momento que se decide qué parte de un sistema será optimizada, hasta el cómo se ponderan numéricamente los valores en la función objetivo. La optimización multiobjetivo con el frente de Pareto deja abierta esta segunda parte, evidenciando cómo diferentes ponderaciones llevan a distintos resultados óptimos. El fin de la optimización técnica es configurar al sistema para mejorar en términos de un criterio dado, y el efecto final retorna al campo de lo complejo, lo indeterminado, y lo subjetivo. Lo anterior nos conduce a una postura hacia los métodos y herramientas de optimización que les entiende más como un apoyo cognitivo y pedagógico que como un método absoluto, es decir, nos a nuevas perspectivas del fenómeno material y el fenómeno técnico para informar nuestro entendimiento y procesos de toma de decisiones.

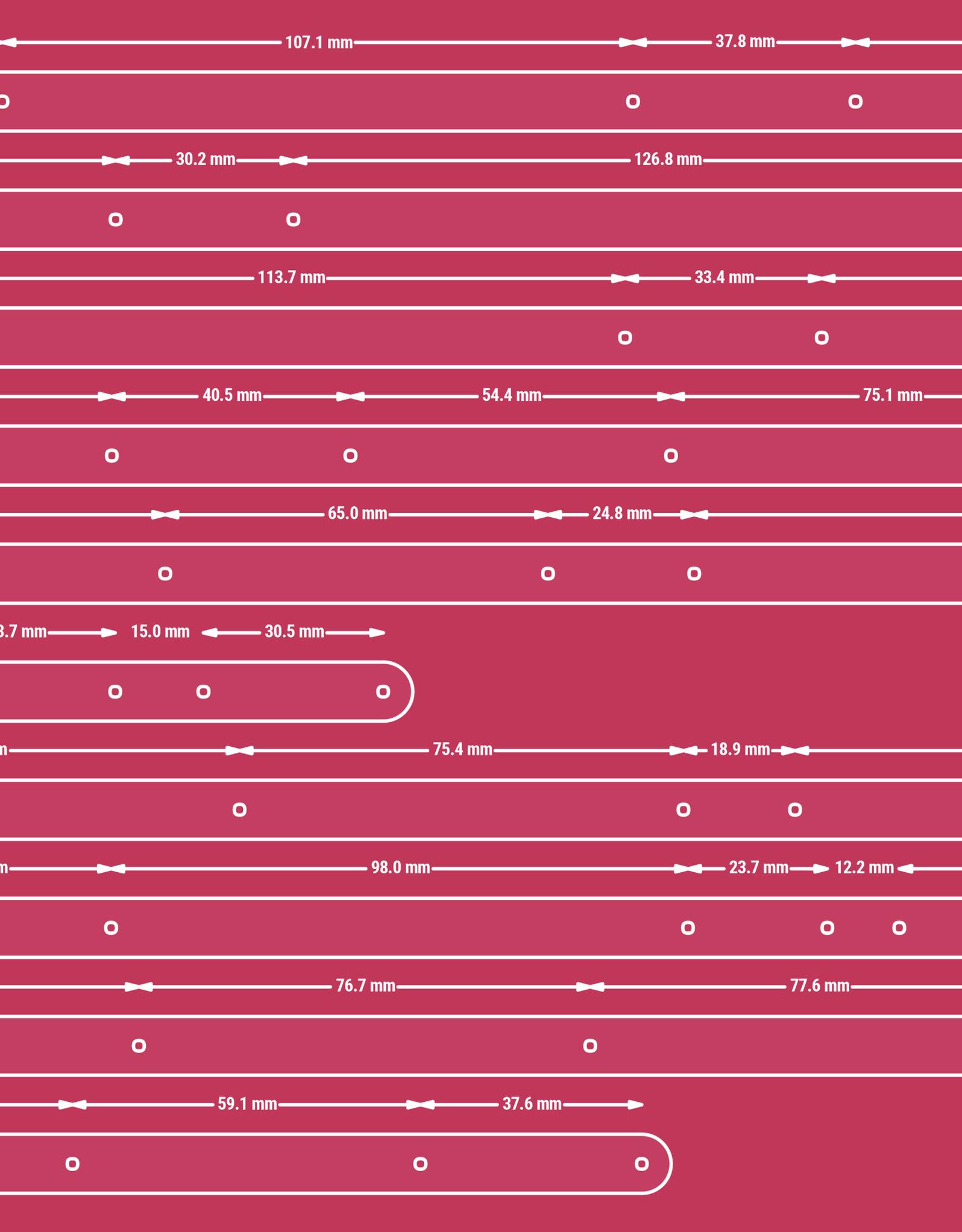
Lo anterior nos ayuda a entender la inexistencia de una verdad científica capaz de afirmar lo que es “mejor” o lo que es “óptimo”. Erosionamos el discurso del suprematismo tecnocientífico desde una teoría que niega la centralidad del conocimiento y el poder en la academia, la industria y el estado. Las contradicciones ubicuas en el pensamiento tecnocientífico nos permite reconocer que existe una multiplicidad de saberes, valores y técnicas con una importante dimensión subjetiva y cultural.

9. Davis Baird (2004) plantea en su filosofía de los instrumentos científicos el asignar una categoría epistémica a los objetos técnicos, dado que en ellos se contienen conocimientos y realizan operaciones cognitivas nivel material.



[Figura 3.14] Los métodos de optimización realizados en el ILEK involucraron la creación de modelos físicos que tenían integrados instrumentos de medición: aparatos para fotogrametría y dinamómetros de pequeño tamaño en los componentes de las maquetas para medir las fuerzas y las deformaciones del objeto a escala: es decir objetos que eran a un mismo tiempo modelos y dispositivos de medición de sí mismos. (Fabricius, 2017)

[Figura 3.15] Máquina de medición de modelos de superficies de jabón. Imagen del archivo del ILEK citada por Fabricius (2017)





4. FABRICACIÓN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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





[Figura 4.0] El 10 de septiembre de 2017 se ensambló la Crisálida en el Centro CitiBanamex, CDMX para la Semana Nacional del Emprendedor. Realizaron el ensamblaje Martha Cruz, Víctor Montserrat, Juan Astorga, Iraís Medina, Víctor Pineda y Erik Molina.

4.Fabricación

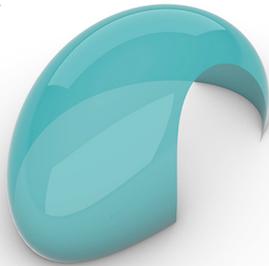
Caso de estudio: Crisálida

Para la Semana Nacional del Emprendedor 2017 el FabLabDF requirió el diseño y fabricación de un pabellón para alojar una experiencia de realidad virtual. El pabellón debía demostrar el potencial de las técnicas de fabricación de control numérico y el diseño computacional. Se propuso al FabLabDF crear un Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa, sistema que no había sido puesto en práctica antes en esa escala, y la propuesta fue aceptada. El tiempo de diseño y desarrollo del proyecto fue de una semana entre el inicio y la fabricación del prototipo a escala. El 11 de septiembre del 2017 la Crisálida se exhibió en la exposición [Figura 4.0, 4.10, 4.11]. En esta sección se toma el caso de estudio de la Crisálida narrando y explicando el proceso.

4.1. Anatomía del cascarón

Componentes constructivos del Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa

Un sistema constructivo representa a un objeto (o categoría de objeto) definiendolo como un conjunto de componentes interrelacionados. En términos generales el sistema constructivo del cascarón reticular está constituido por elementos lineales (rectos o curvos) interrelacionados (interconectados) mediante nodos. A continuación se describen diferentes conceptos y componentes del sistema constructivo.



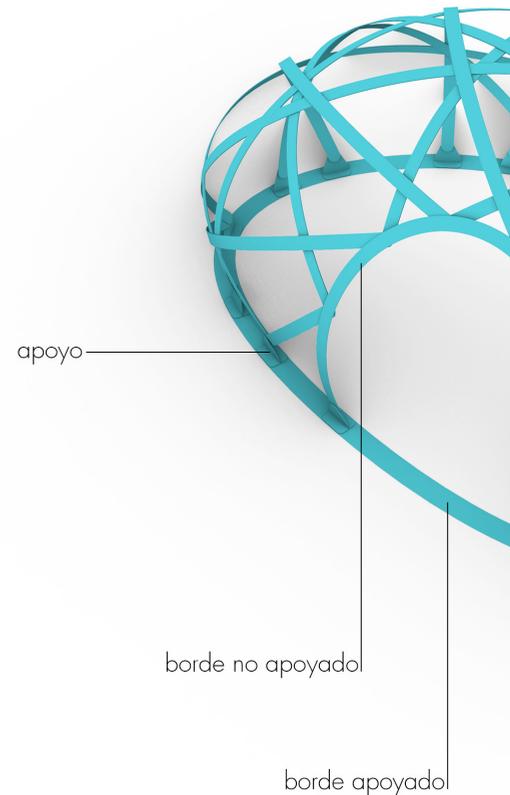
[Figura 4.1] superficie tipo NURBS como representación computacional de la geometría del cascarón. Se obtuvo la forma intersectando un esferoide con el piso y una esfera.

4.1.1. Superficie

La geometría a la que busca aproximarse el cascarón reticular puede representarse como una superficie [Figura 4.1]. Las superficies polinomiales, mallas de polígonos y superficies tipo NURBS (usadas en este caso con el programa Rhinoceros3D) son métodos típicos para la representación computacional de superficies, sin embargo es posible utilizar otros métodos e.g. un modelo físico de arcilla o plastilina. En el cascarón de Mannheim (Burkhardt et al 1978) Otto y su equipo nombraban a la matriz de coordenadas y vectores (resultantes de la simulación computacional de la red colgante) superficie funicular o superficie de Linkwitz. En la crisálida se utilizó una superficie esferoide tipo NURBS con una intersección en el plano del piso. Existen ejemplos de cascarones cuya geometría base consiste en superficies paraleloides, superficies intersectadas y superficies periódicas, algunos ejemplos son mostrados en la sección anterior. La geometría del cascarón construido siempre tendrá desviaciones con respecto a la superficie representada computacionalmente causa de las deformaciones por carga, detalles de los elementos constructivos, y errores en la fabricación. Uno de los objetivos de la simulación mecánica es saber la desviación que se tendrá por las deformaciones.

4.1.2. Borde apoyado

El contorno donde termina la superficie es el borde, generalmente es el sitio donde hay una mayor concentración de fuerzas. Si hay elementos que transmitan las fuerzas al piso, ya sea la cimentación u otro cuerpo rígido, puede considerarse un borde apoyado. En la crisálida el borde apoyado es la intersección entre el esferoide y el plano del piso, y las fuerzas se transmiten mediante las piezas de los apoyos articulados y unidos al anillo a flexión (base).



4.1.3. Borde no apoyado

El arco de acceso es un contorno de la superficie que no está en contacto con un cuerpo rígido más que en sus extremos, es un ejemplo de borde no apoyado. La trayectoria del arco no es geodésica, fue obtenida de la intersección de una esfera con el esferoide original, por lo tanto la barra desarrollada no es recta. El borde concentra una gran cantidad de fuerzas que transmite a los apoyos en sus extremos.

4.1.4. Barra

Las barras son los elementos lineales que al deformarse y conectarse forman el entramado del cascarón. La trayectoria de las barras es geodésica lo que permite que al desarrollarse (volverse planas) sean rectas. Su mayor trabajo mecánico es la flexocompresión.

4.1.5. Nudo

Las barras (y los tramos de barra) se conectan en las intersecciones con tornillos que permiten un movimiento de tijera (rotación tangente a la superficie), movimiento que se restringe al añadir las otras barras.

4.1.6. Apoyo

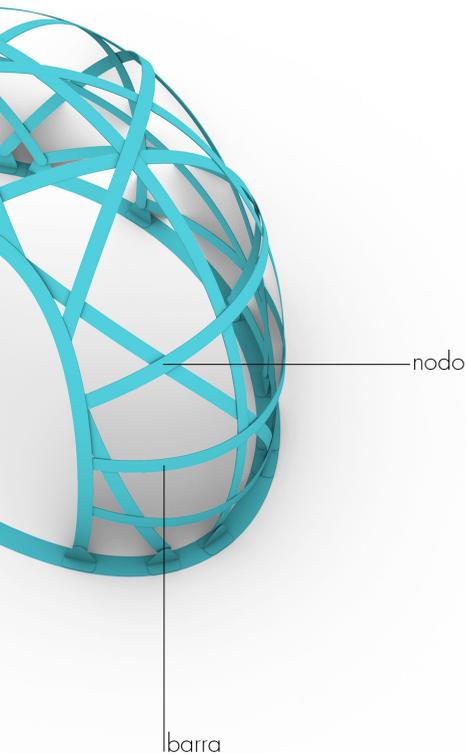
El apoyo es un tipo de nudo que conecta las barras con la cimentación, el suelo o algún cuerpo rígido y su función es la transmisión de fuerzas. En la crisálida se usa el anillo de flexión como una interfaz que relaciona los apoyos con el suelo. Las flexiones producidas por el pretensionamiento y las cargas laterales son restringidas por el anillo, y las cargas gravitacionales son transmitidas al suelo directamente.

4.1.7. Entramado

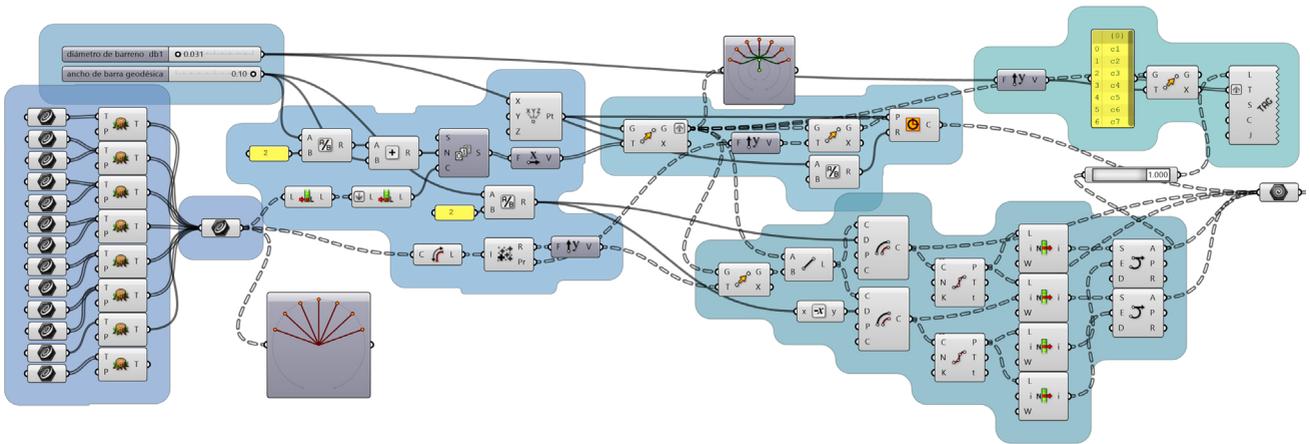
Dependiendo del tipo de relación geométrica que hay entre las barras se obtiene una retícula o entramado. Los domos geodésicos de fuller fueron patrones triangulados, mientras que los cascarones de Otto fueron mallas cuadrilaterales (con módulos cuadrados al ser armadas en el piso, que se transformaban en rombos de diferentes ángulos al adquirir la forma tridimensional). El trazo geodésico sólo permite entramados regulares en casos específicos como esferas o cilindros. En superficies de forma libre los entramados son irregulares. En la crisálida se generó un entramado con tres familias de barras paralelas con el fin de generar triángulos en la superficie que restringieran el movimiento de tijera.

4.1.8. Piel

Existe una amplia gama de opciones técnicas para el recubrimiento del cascarón (e.g. textiles, FRPs laminares, maderas, cerámicas, polímeros, técnicas artesanales, etc.), no obstante quedan fuera del alcance de esta investigación.

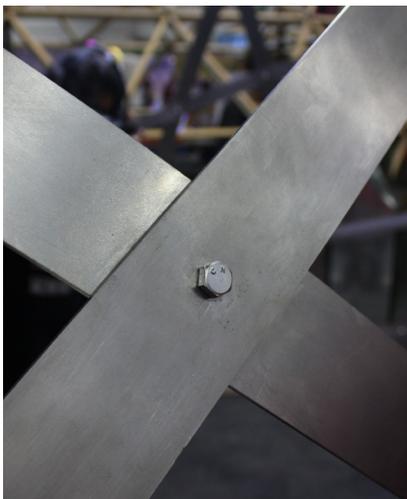


[Figura 4.2] partes del Cascarón Reticular Geodésico de Flexión Activa.



[Figura 4.3] Definición paramétrica para la conversión de segmentos de curvas tridimensionales en un patrón de barras rectas bidimensionales. Para las familias de barras *m* y *a* se utilizó una definición casi idéntica.

[Figura 4.4] El nodo es (geoméricamente) el punto en el que se intersectan los ejes de las barras, constructivamente es el conjunto de piezas que unen a una barra con otra o con el borde. En la crisálida consiste de barrenos, tornillo y tuerca.



4.2. Detalles constructivos

Diseño paramétrico y computacional de componentes

4.2. Barras

Las barras se fabrican a partir de un material laminar, extruido recto o lineal. Se considera el largo máximo para subdividir las barras en el cascarón tridimensional. Para la crisálida se utilizó lámina de acero rolando en caliente de 50 ksi, en paneles de 3 m x 0.9 m. Las barras en el cascarón mayores a 3 m se subdividieron en tramos más pequeños. Las barras geodésicas representadas por curvas tridimensionales fueron trazadas en tres familias *c*, *m* y *a* (correspondiente a los colores asignados cian, magenta y amarillo). [Figura 4.3] A cada tramo también se le asigna un número, esta nomenclatura de letra y número ayuda a distinguir las barras en el diseño de detalles y en el proceso de ensamblaje.

Se realizó una definición paramétrica en Grasshopper para automatizar la conversión de curvas tridimensionales [Figura 4.3] a una representación bidimensional [Figura 4.5]. La definición toma como *input* un conjunto de curvas tridimensionales que representan el eje de las barras. Tales curvas se seccionan (en la ubicación de algún nodo) en tramos que no superen el largo máximo del material antes de insertarse en la definición. Se miden las distancias entre nodos y se trazan las barras en el plano *xy*. Para trazar las barras en plano se genera una sucesión de puntos (dirección *y*) que representan el origen de cada barra. A partir del origen se trazan puntos consecutivos donde la distancia entre puntos (dirección *x*) equivale a la distancia entre nodos. Tomando estos puntos como centro se trazan círculos cuyo diámetro es 1/6" mayor que el diámetro del tornillo para representar los barrenos. Por último se traza el contorno de la barra, en la crisálida se usaron extremos redondeados, y se traza la nomenclatura en cada barra que puede ser grabada también con la máquina de control numérico.



[Figura 4.5] Patrón de barras rectas bidimensionales, resultado de la definición paramétrica.

4.3. Borde no apoyado

Como el arco de acceso no tiene una trayectoria geodésica, cuando se desarrolla (sobre el plano) su forma es curva, lo que requirió un proceso de fabricación especial. Se generó una superficie para representar el arco, se crearon los orificios de los barrenos con sustracciones booleanas con esferas, la superficie se desarrolló con el comando “unroll” y se dividió en tres tramos para reducir el desperdicio al cortar la lámina.

4.4. Borde apoyado

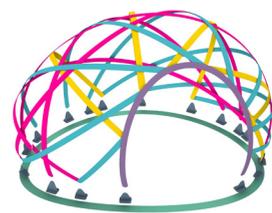
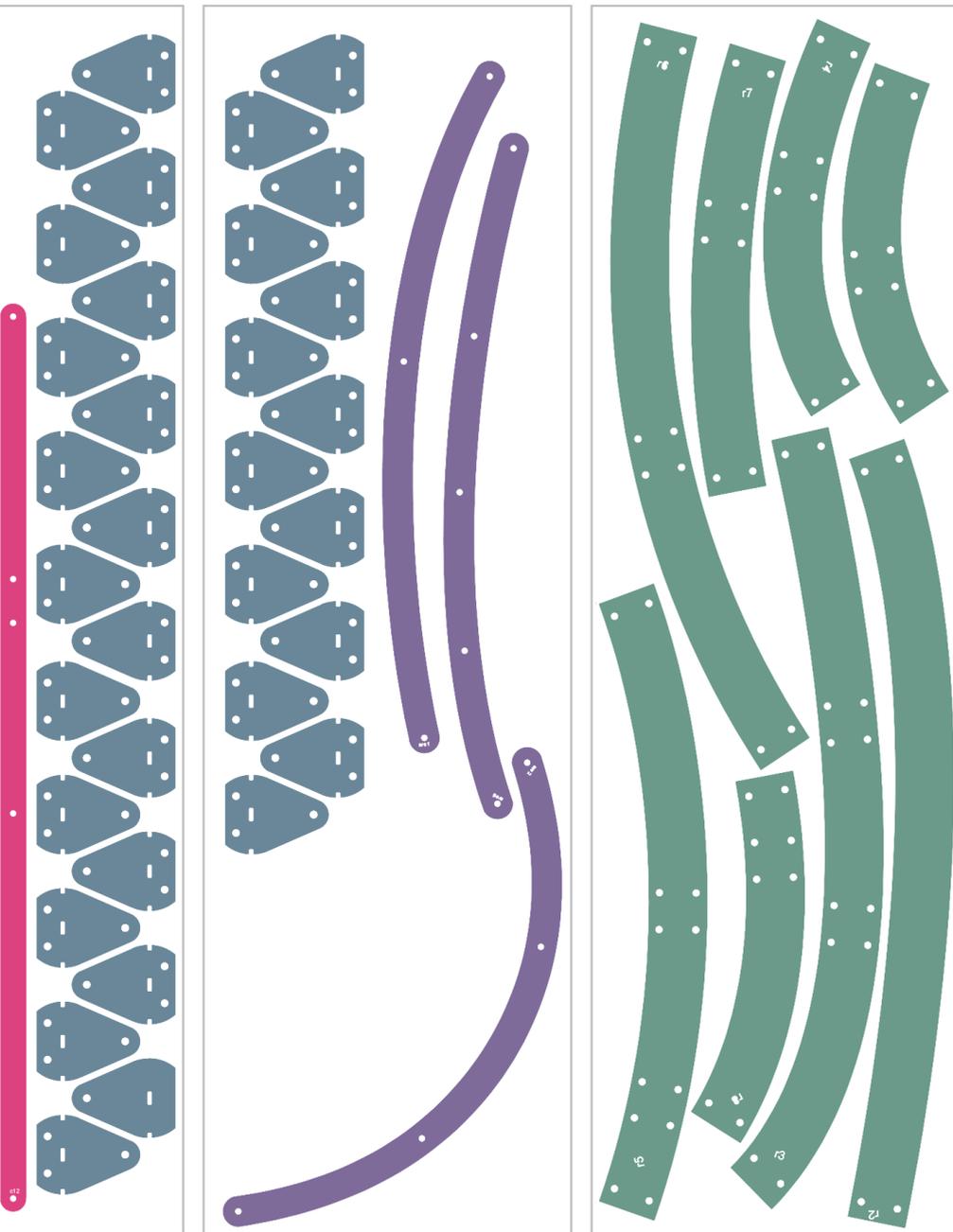
Apoyos y anillo de flexión

Para lograr la geometría precisa de las barras, es necesario que los apoyos sean articulados de manera tangente y también perpendicular a la superficie. Esto se logra con un apoyo con doble articulación. La articulación tangente es el barreno donde se conectan las barras. La articulación perpendicular es la bisagra elastoplástica que se genera con el corte punteado y doblez. El apoyo articulado está conformado por dos piezas simétricas [Figura 4.6] que se atornillan al anillo de flexión. El anillo está segmentado en tramos menores que caben en la placa [Figura 4.7], los tramos de las dos capas del anillo están traslapadas para lograr la rigidez a flexión del cuerpo. Las uniones entre estos elementos ocurren a la mitad de los apoyos para utilizar el mismo sistema de sujeción atornillado.



[Figura 4.6] El apoyo utilizado en la crisálida transmite la carga de las barras al anillo de flexión y al suelo.





[Figura 4.7] Patrón para la cortadora de CO₂ de control numérico. Se muestran (de izquierda a derecha) barras cian, amarillas y magenta, apoyos, barras del arco y piezas del anillo de flexión. La placa en que se cortó tiene dimensiones d 3m x 0.9m.

[Figura 4.8] Tabla cuantitativa de características de la Crisálida.

nodos	65
área superficial	23.81 m ²
área cubierta	8.87 m ²
volumen interior	14.37 m ³
longitud de barras	77.06 m ²
masa total	152 kg
masa por área	6.33 kg m ⁻¹

4.5. Fabricación en taller

La crisálida fue fabricada en el FabLabDF, las máquinas utilizadas fueron una cortadora de CO₂ de control numérico para metales y una fresadora CNC para las piezas de MDF (utilizadas para la primera capa del anillo de flexión, después sustituidas por piezas iguales de PVC). Se utilizaron láminas de acero de 0.9 m x 3.00 m. Antes de la fabricación se realizó un prototipo pequeño para verificar la factibilidad constructiva de la Crisálida, donde se identificó un error en uno de los nodos superiores, donde tres barras se traslapaban en un triángulo con lados menores al ancho de las barras ocasionando la colisión de nodos y barras. En el diseño de componentes se hicieron las correcciones. En el prototipo a escala se colocó la nomenclatura de las barras para usar como guía, cosa que facilitó en gran medida todos los ensamblajes posteriores de la crisálida. Todas las piezas se cortaron en las máquinas CNC utilizando 5 placas de acero y dos de MDF. Las piezas de los apoyos se doblaron con prensas, aunque una dobladora de acero hubiese sido más adecuada. Se realizó un ensamblaje de prueba en el taller con dos personas en un tiempo aproximado de 6 horas. Se utilizaron tornillos de 3/8" para los nodos. Posteriormente la estructura se desensambló y se agrupó para su transporte.

4.6. Ensamblaje en sitio

Los componentes fueron agrupados en paquetes que pudieran ser cargados por dos personas y se transportaron al sitio [Figura 4.9]. Se comenzó por colocar las piezas del anillo de flexión, después los apoyos y sus respectivos tornillos. Los apoyos fungieron también como ensambles para las piezas de la base. A cada apoyo se le conectaron sus respectivas barras *cma*. Las tres piezas del arco primero se armaron en el suelo y después se colocaron en sus dos apoyos. Los



[Figura 4.9] Piezas del cascarón desarmado después del ensamble de prueba en el FabLab. De izquierda a derecha: barras cma, piezas de la primera capa del anillo de flexión en MDF, piezas de la segunda capa del anillo a flexión en acero, barras del arco de acceso, piezas dobladas, llaves y prensas. Abajo: tornillos y tuercas para las uniones. El peso total de las piezas es de 152 kg.





nodos que conectaban más barras y los que estaban en ubicados en puntos de la superficie con mayor curvatura requirieron más fuerza para ser colocados, se utilizaron prensas y llaves para atornillarlos. Las últimas barras colocadas fueron las de la parte superior.

Después de la exposición la crisálida se desarmó y se almacenó en el FabLab. Unos meses después se pintó con electropintura horneada azul y se volvió a exhibir en un parque en toluca donde permaneció aproximadamente seis meses. Un año después de su fabricación regresó a la Ciudad de México para ser presentada en la Muestra Estudiantil 2018 de la Facultad de Arquitectura de la UNAM Figura. [Figura 12, 13, 14, 15] Posteriormente fue vendida a un particular.

Conclusiones de fabricación

El prototipo ejemplifica la factibilidad constructiva y estabilidad estructural del cascarón reticular. Se logra una interfaz entre formas ortogonales (soleras) y la forma final de doble curvatura, cuya geometría se obtiene de la interacción mecánica de las barras a medida que sucede el ensamblaje, ejemplificando también como la información necesaria para la transformación de las barras en una geometría muy específica pudo inscribirse materialmente en las distancias internodales (longitud entre barrenos) con apoyo en la capacidad de flexión del material. La inexactitud del modelo sólo fue problemática en la colocación del último tornillo donde se sumaron cumulativamente las inexactitudes dadas por las tolerancias en los barrenos y el espesor de las piezas. La crisálida pudo ensamblarse y desensamblarse exitosamente por un mínimo de dos personas y una persona respectivamente. Para la realización de un modelo más exacto será necesario tomar en consideración otros factores que afectan a los modelos de simulación y optimización. Esto será necesario para proyectos de mayor escala o que exigen mayor precisión.

[Figura 4.10] 10 de septiembre de 2017. Imágenes del proceso de ensamblaje de la Crisálida. Realizaron el ensamblaje Martha Cruz, Víctor Montserrat, Juan Astorga, Iraís Medina, Víctor Pineda y Erik Molina.



[Figura 4.11] Experiencia de realidad virtual en el interior de la Crisálida.



EVA
YAN

HAC
EL
PAR

QUE
COCAL

C

USE

MUSE





[Figura 4.12] 28 de octubre de 2018, Ciudad Universitaria UNAM. A partir de la Muestra Estudiantil de la Facultad de Arquitectura la Crisálida se expuso Vestíbulo de la FA.



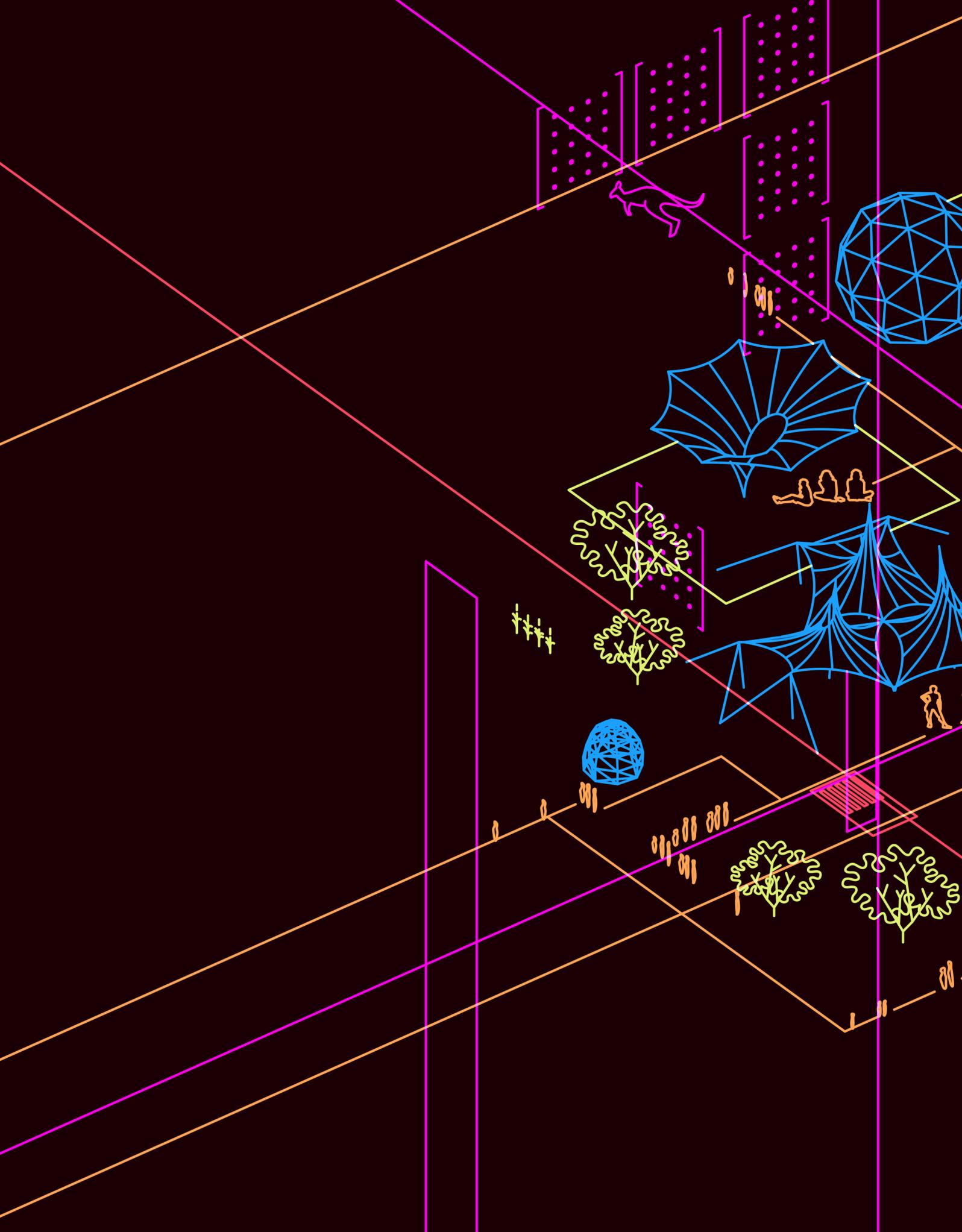
[Figura 4.13] Crisálida en el vestíbulo de la FA.

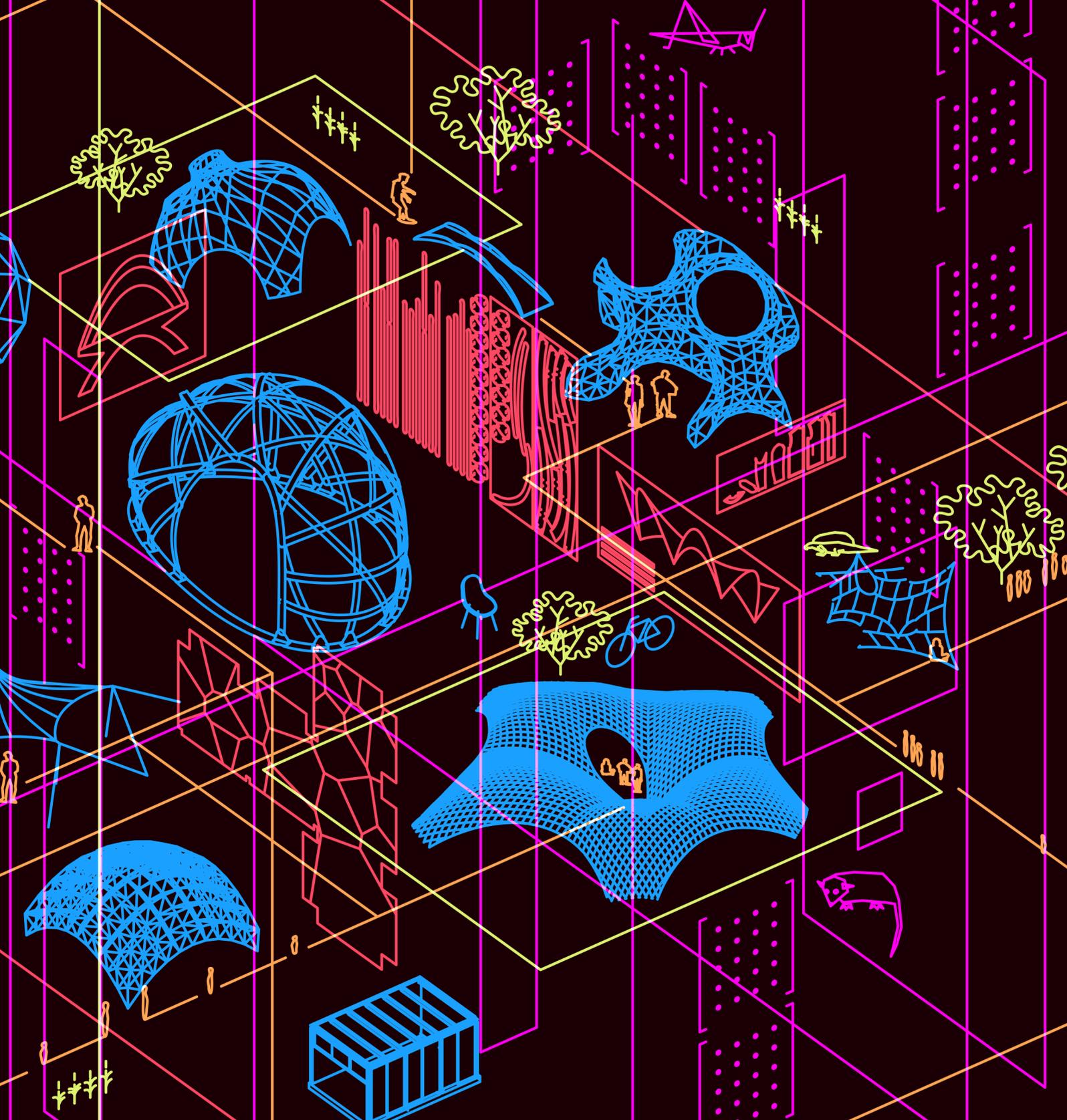


[Figura 4.14] Crisálida en el vestíbulo de la FA.



[Figura 4.15]Crisálida junto al acceso de MUCA.





5.CONCLUSIONES



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

5. Conclusiones

5.1. La génesis de lo técnico

Este trabajo comenzó con una investigación técnica delimitada en el campo de los algoritmos genéticos y el diseño estructural, pero dado que las explicaciones técnicas no fueron suficientes para entender ciertas cuestiones de la concreción técnica, o la génesis de lo técnico, se utilizaron herramientas teóricas de las ciencias sociales y la filosofía de la tecnología. En ese proceso se identificó la dificultad metodológica de la interacción de lenguajes y conocimientos pertenecientes a disciplinas que convencionalmente interactúan poco: las disciplina arquitectónica, la tecnología, la ciencia natural y la ciencia social. Pero es justamente en esos espacios que no pertenecen a una disciplina demarcada, en las intersecciones entre los campos del conocimiento, de donde emergen nuevos discursos e interpretaciones del fenómeno sociotécnico. Si el pensamiento crítico es marginado de la práctica académica y profesional, entonces hay que buscarlo en esos márgenes.

La Academia está inmersa en una mecánica de la reproducción de investigaciones que si bien son cada vez más detalladas o especializadas, carecen de la capacidad de realizar un verdadero salto paradigmático o emitir una crítica. Esta mecánica también se caracteriza por una obsesiva competitividad logocéntrica, y la jerarquización impuesta por instituciones académicas estatales o comerciales (por ejemplo las empresas de software, las manufactureras de dispositivos tecnológicos, y los centros de investigación¹). Es un reto revertir esta relación impuesta pero asumiendo que partimos del mismo cuerpo de conocimiento que intentamos desafiar, buscamos y generar otras formas de relación entre lo tecnocientífico y la actividad humana. La desmitificación de la ciencia como sinónimo de verdad ayuda a desjerarquizarla y deconstruir sus ideologías intrínsecas, respecto a lo que nos concierne en el gremio arquitectónico, y encontrarle un nuevo papel como mediadora de procesos humanos, con autoconciencia de sus contradicciones y limitaciones. Erosionado el constructo mítico que sustenta al monopolio de la verdad de la ciencia-capital-estado, podemos reflexionar sobre nuevas formas de conocer y validar el conocimiento para conducir nuevos constructos culturales. En el desafío de las estructuras del poder impuestas se reconoce la tarea de descolonizar y despatriarcalizar el pensamiento técnico, esta intención pretende ser el hilo conductor de trabajos posteriores.

1. Tres ejemplos respectivos son: Autodesk, y su onnipresencia en el mercado del software para la edificación; KUKA Robotics, con presencia en el mundo académico y de investigación con una clara intención comercial; y el MIT Media Lab, cuyas investigaciones tienden a imponer agenda en el mundo académico.

Herramientas computacionales como grasshopper permiten la extrapolación y superposición de diferentes teorías para la representación de ideas o fenómenos. Aunque replican la racionalidad científica hegemónica, ponen estos conocimientos en un nivel accesible para el público posibilitando su entendimiento y uso crítico. Se desafía la idea de conocimiento como mercancía o como propiedad privada, desde donde se pueden crear nuevas construcciones para guiarnos en la transformación de las realidades sociotécnicas que habitamos. Una transformación donde la desjerarquización de las relaciones técnicas (además de otras relaciones sociales) permita asumir y reconocer la inteligencia colectiva del ensamble sociotécnico que no está contenida en las inteligencias individuales humana o artificial, sino que emerge de las interacciones lo constituyen.

5.2. Subvertir la técnica

En este trabajo se ha construido el discurso sobre la idea de que lo social y lo técnico se constituyen mutuamente, y esto se ha enunciado desde el concepto del ensamble sociotécnico. Entender la génesis técnica implica entonces reconocer y profundizar en la reflexión sobre su realidad humana. Esto nos permitió percatarnos de la no-neutralidad de la tecnociencia, de su no-individualidad, y de su posición contextual en un orden civilizatorio capitalista, patriarcal, neocolonial y extractivista. El método que se utilizó para explicar la génesis de lo técnico desde un planteamiento desafiante del paradigma tecnocientífico hegemónico fue identificar y explicar la reciprocidad entre conceptos técnicos y conceptos sociales.

Este procedimiento teórico expuso dos nociones que al comienzo de este trabajo nos eran desconocidas. La primera es que todos estos objetos creados por el gremio académico del diseño computacional, por ejemplo, pabellones biomiméticos, bóvedas funiculares de sección mínima, tejidos robotizados de fibras reforzadas con polímeros, e impresiones 3D con biomateriales (entre otros), obedecen a una agenda tecnopolítica, supremacista y excluyente, que estetiza/fetichiza la sofisticación técnica, y que jerarquiza lo computacional y la ciencia natural por encima de otros tipos de conocimiento excluyendo paradigmáticamente toda práctica crítica o disidente. La segunda es que lo técnico es tan presente y está fundido a tal grado con nuestras vidas y “realidad”

humana, que si buscamos un cambio social fundamental, este no sucederá desde la política institucional, sino desde las diferentes dimensiones de la existencia humana des-jerarquizadas y des-categorizadas, entre ellas, lo técnico. Estas dos reflexiones nos llevan al cuestionamiento ¿en qué medida deseamos ser partícipes de la práctica hegemónica?, y si la respuesta es negativa, ¿cómo conducir una práctica alternativa?

Existen en el debate social diferentes propuestas para la resolución de los “problemas sociales”. Desde una postura crítica nos oponemos a las propuestas de “progreso social” dadas por el discurso hegemónico, como las “ecotecnias”, la “acupuntura urbano-ambiental”, las iniciativas de caridad “ecosocial”, el discurso de sostenibilidad y resiliencia, que invisibilizan las externalidades^{1,2} de las cadenas internacionales de extracción, explotación, y producción de valor, y que terminan transformando el problema en la solución sólo a nivel discursivo. También ponemos en tela de juicio las propuestas de un regreso a las formas sociales anteriores a la alta tecnificación, dado que una “sociedad des-tecnologizada” es una contradicción ontológica dentro del marco teórico propuesto. Nuestro planteamiento para detonar la reflexión respecto a cómo conducir nuevas prácticas técnicas es subvertir las tecnologías.

La génesis de lo técnico que aquí se plantea no es la de la “creación” o la evolución lineal, sino un proceso heterogéneo de transmutaciones simultáneas de lo humano y lo técnico, explicable desde lo sociopolítico y lo cultural. El concepto de código abierto^{3,4,5} las bases de datos libres para la socialización del conocimiento, las disidencias cibernéticas, las autonomías tecnológicas y la toma de los espacios virtuales por los movimientos sociales son ejemplos de contra-hegemonía en la esfera técnica. Si reconocemos lo hegemónico y totalitario encapsulado en universo de objetos antropogénicos que nos rodea y media nuestras relaciones, es posible mutarlos, deconstruir y reconstruirlos (simbólica y materialmente), “voltarlos”, rehabilitarlos para que reproduzcan intenciones diferentes para las que fueron creados, transformarlos, y al hacerlo, a la vez transformarnos.

1. *Externalidades es un concepto utilizado en Economía para referirse al daño a terceros provocado por la actividad productiva. Cuando el daño es social, se designa “costo social”. (Dahlman, 1979)*

2. *También se usa el concepto “conflicto socioambiental” en ciencias sociales, cuando la afectación lleva a la confrontación entre actores. Estos conflictos son la norma en la vida social, y develan las diferencias de poder existentes. (Paz & Ridsell, 2014)*

3. *El código abierto (open-source en inglés) articula formas productivas de autoaprendizaje y modelos de creatividad des-centralizada. Esta iniciativa desafía las categorías liberales de producción cultural, autoría y propiedad intelectual, así como la mercantilización del conocimiento. (Berry, 2008)*

4. *Aunque comenzó como una iniciativa en el mundo de la programación, se ha extendido a otras disciplinas. Un ejemplo es el proyecto “Open Insulin” que desarrolla la tecnología y una comunidad para la producción de insulina a pequeña escala, con el fin de crear una red mundial de organizaciones locales gestionadas por las personas que usan y necesitan la insulina. (Open Insulin Project, 2020) Ver sitio web en: <https://openinsulin.org/>*

5. *En el mundo del diseño existen también iniciativas y comunidades de código abierto (opensource.design.net, 2020) con principios como la colaboración, la inclusión, y el auto-aprendizaje. Algunos ejemplos son Open-Source Design Net y Open-Desk (opendesk.cc, 2020)*

6. Referencias

- Adriaenssens, S., Block, P., Veendaal, D., Williams, C. (2014) *Shell Structures for Architecture, Form Finding and Optimization*. London and New York: Routledge.
- Alotto, P., Baumgartner, U., Freschi, F., Jaindl, M., Köstinger, A., Magele, C., & Repetto, M. (2008). SMES optimization benchmark extended: Introducing pareto optimal solutions into TEAM22. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(6), 1066–1069. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.916091>
- Atamturktur, S., Egeberg, M., Hegenderfer, J., Lebensohn, R. A., Unal, C., & Williams, B. (2015) A resource Allocation Framework for Experiment-Based Validation of Numerical Models, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 22(8), pp.641-643, DOI: 10.1080/15376494.2013.828819
- Atamturktur, S., Hegenderfer, J., Williams, B., & Unal, C. (2014) Selection Criterion Based on an Exploration-Exploitation Approach for Optimal Design Experiments. *Clemson: Clemson University*
- Baird, D. (2004). *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Bechert, S., Knippers, J., Krieg, O. D., Menges, A., Schwinn, T., Daniel, S., (2016). Textile Fabrication Techniques for Timber Shells, Elastic Bending of Custom-Laminated Veneer for Segmented Shell Construction Systems. *Advances in Architectural Geometry 2016*, pp 154-169. DOI 10.3218/3778-4_12
- Berry, D. M., (2008) *Copy, Rip, Burn: The Politics of Copyleft and Open Source*. London: Pluto Press.
- Bijker, W. (2016). Response to Critical Theory of Technology & STS. Symposium on Critical Theory of Technology & STS. [archivo de video] Maastricht University: [archivo de video] recuperado de: <http://www.maastrichtsts.nl/feenberg-video>
- Bijker, W. & Law, J. (1992). *Shaping Technology / Building Society*. Cambridge, MA: The MIT Press.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

- Bijker, W. E. (2009) Social Construction of Technology. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), A Companion to the Philosophy of Technology (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Block Research Group (2018). KnitCandela - A flexibly formed thin concrete shell at MUAC, Mexico City, 2018. Block Research Group, ETH Zürich. Recuperado de: <http://www.block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>
- Boon, M. (2009) Instruments in Science and Technology. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), A Companion to the Philosophy of Technology (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Borges, J. L., (1946) Historia universal de la infamia. Segunda edición. Buenos Aires: Emecé Editores
- Buhmann, M. D., Fletcher, R. (1996, oct). M. J. D. Powell's work in univariate and multivariate approximation theory and his contribution to optimization. Seminar für Angewandte Mathematik Research Report No. 96-16. Zürich, Switzerland: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Burkhardt, B., Chaaaitas, Michael., Langner, J., Langner, W., Lubberger, G. (1978) IL 13 Multihalle Mannheim. Instituts für leichte Flächentragwerke Zeitschrift #13. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Carranza, J.E., Martínez, V. M., Domínguez, D. (2018) El Nuevo Desarrollo Territorial, Sectores Urbanos Globalifílicos Repositorio Universitario. Instituto de Investigaciones Económicas UNAM. Recuperado de: <http://ru.iiec.unam.mx/3841/1/197-Carranza-Mart%C3%ADnez-Dom%C3%ADnguez.pdf>
- Carrol, L. (1893) Sylvie and Bruno Concluded. Reino unido: Macmillan and Co.
- Cervantes, T. (2015) Contrasoma ¿o cómo la tensión de cuerpo y [bio]poder hace la arquitectura [post]moderna? Tesis. Ciudad de México: Biblioteca Central UNAM
- Cirrito, F. & Tobin, P. (2004) Mathematical Investigation and Modeling, Mathematics

- Standard Level (3rd ed.), (pp:89). Victoria: IBID Press.
- CODA (2015) CODA Computational Design Affairs: Trabajo. [archivo de imagen] Recuperado el 29 de marzo de 2019 de: <http://coda-office.com/work>
- Coley, D. A. (1999) An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers. Singapore: World Scientific Publishing Co.
- Collins, H. (2009) Social Construction of Science. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), A Companion to the Philosophy of Technology (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Conn, A. R., Scheinberg, K., Vicente, L. N. (2009). Introduction to Derivative-Free Optimization. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Crolla, K. (2017) Building indeterminacy modelling - the ZCB Bamboo Pavilion as a case study on nonstandard construction from natural materials. Hong Kong: University of Science and Technology
- Dahlman, C. J. (1979) The Problem of Externality. *Journal of Law and Economics*, Vol. 22, No. 1. (Apr., 1979), pp. 141-162. Chicago: The University of Chicago Press.
- De Landa, M. (2006). A New Philosophy of Society: Assemblage Theory and Social Complexity. New York, NY: Continuum.
- Deb K., Gupta H. (2005) Searching for Robust Pareto-Optimal Solutions in Multi-objective Optimization. In: Coello Coello C.A., Hernández Aguirre A., Zitzler E. (eds) Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3410. Springer, Berlin, Heidelberg
- Diez, M., Volpi, S., Serani, A., Stern, F., & Campana, E. F. (2019). Simulation-Based Design Optimization by Sequential Multi-criterion Adaptive Sampling and Dynamic Radial Basis Functions. *Computational Methods in Applied Sciences*, 48, 213–228. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89988-6_13
- Dusek, V. (2009) Philosophy and Technology. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), A Companion to the Philosophy of Technology (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.

- Fabricius, D. (2017). Schwellen des Kalküls die Materiellen Experimente Frei Ottos. Architektur als vermutete Zukunft, Symposium im Rahmen der Ausstellung "Frei Otto. Denken in Modellen". Technische Universität München: [archivo de video] recuperado de: <https://zkm.de/de/media/video/daniela-fabricius-architektur-als-vermutete-zukunft>
- Feenberg, A. (2010). *Between Reason and Experience: Essays in Technology and Modernity*. MA: The MIT Press.
- Feenberg, A. (2016). *Critical Theory of Technology & STS*. Symposium on Critical Theory of Technology & STS. Maastricht University: [archivo de video] recuperado de: <http://www.maastrichtsts.nl/feenberg-video>
- Fuller, R. B. (1969). *Operating Manual for Spaceship Earth*. New York: Simon and Schuster.
- Fuller, R. B. (1975). *Synergetics, Explorations in the Geometry of Thinking*. Sebastopol CA: Macmillan Publishing Co. Inc.
- Fuller, R. B. (1981). *Critical path*. New York: St. Martin's Press.
- Fuller, R. B. (1983). *Grunch of Giants*. New York: St. Martin's Press.
- Gengnagel, C., Alperman, H., Lafuente, E. (2014). *Active Bending in Hybrid Structures*. Department of Structural Design and Technology. Berlin: University of the Arts Berlin.
- Gengnagel, C., Kilian, A., Palz, N. & Scheurer, F. (2011) *Computational Design modeling*, Proceedings of the Design Modeling Symposium Berlin 2011. Berlin-Heidelberg: Springer.
- Gremmen, B. (2009). *The Interplay Between Science and Technology*. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), *A Companion to the Philosophy of Technology* (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Gutmann, H. M. (2001). A radial basis function method for global optimization. *Journal of Global Optimization*. n 19: 201–227. Netherlands: Kluwer Academic Publishers

- Henderson, D., Jacobson S. H., Johnson A. W. (2003) The Theory and Practice of Simulated Annealing. En: Glover F., Kochenberger G. A. (eds) Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, vol 57. Boston, MA: Springer.
- Hooke, R., Jeeves T.A. (1961) "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems. Journal of the Association for Computing Machinery 8:2, pp 212–229
- Horkheimer, M., & Adorno, T. (1944) Dialéctica de la ilustración. Traducción al español por Juan José Sánchez (1998) Decima edición (2018). Madrid: Editorial Trotta.
- Houplan, L., & De Crécy, H. (2002) Remind Me, Music video for Röyksopp. H5: Paris.
- Ihde, J. (2009). Technology and Science. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), A Companion to the Philosophy of Technology (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Institute for Computational Design (2016) ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16. Institute for Computational Design, University of Stuttgart. [archivo de imagen] Recuperado el 29 de marzo de 2019 de: <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=16220>
- Jahn, J. (2007). Introduction to the Theory of Nonlinear Optimization. Leipzig, Sachsen: Springer.
- Kanstinger, C. (2017). Architektur als vermutete Zukunft, Symposium im Rahmen der Ausstellung "Frei Otto. Denken in Modellen". Technische Universität München: [archivo de video] recuperado de: <https://zkm.de/de/media/video/christine-kanstinger-architektur-als-vermutete-zukunft>
- Khanesar, M. A., Tavakoli, H., Teshnehlab, M., Shoorehdeli, M. A. (2009) Novel Binary Particle Swarm Optimization. En: Lazinica, A. (2009) Particle Swarm Optimization. Vienna: In-Tech.
- Kilian, A. & Ochsendorf, J. (2005) Particle-Spring Systems for Structural Form Finding, Journal of the International Association for shell and spatial structures: IASS, Vol.46 No.147
- Kleinmanns, J. (2017). Architektur als vermutete Zukunft, Symposium im Rahmen der Ausstellung "Frei Otto. Denken in Modellen". Technische Universität München: [archivo de video] recuperado de: <https://zkm.de/de/media/video/joachim-kleinmanns-architektur-als-vermutete-zukunft>

- Koziel, S., & Bandler, J. W. (2007). Space-mapping optimization with adaptive surrogate model. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(3), 541–546
- Koziel, S., Leifsson, L. (2013). *Surrogate-Based Modeling and Optimization, Applications in Engineering*. New York, NY: Springer
- Kuijvenhoven, M. (2009) A design Method for Timber Grid Shells. MSc thesis. Delft: Technische Universiteit Delft
- Kunz, M. (2017). Von der Gitterschale in Essen zur Multihalle in Mannheim. Architektur als vermutete Zukunft, Symposium im Rahmen der Ausstellung "Frei Otto. Denken in Modellen". Technische Universität München: [archivo de video] recuperado de: <https://zkm.de/de/media/video/joachim-kleinmanns-architektur-als-vermutete-zukunft>
- La Magna, R., Schleicher, S., Knippers, J. (2016) Bending-Active Plates, *Advances in Architectural Geometry 2016*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Lienhard, J. (2014). Bending-Active Structures, Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein (Tesis doctoral). Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/265258249_Bending-active_structures_form-finding_strategies_using_elastic_deformation_in_static_and_kinetic_systems_and_the_structural_potentials_therein
- Lienhard, J., & Gengnagel, C. (2018). Recent developments in bending-active structures. *IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design*, (July).
- Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C. & Knippers, J., (2013). Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process. *International Journal of Space Structures* Vol.28 No. 3&4 , 187-196.
- Linkwitz, K., (1991, Mayo). Formfinding of Lightweight Surface Structures by Geodetic Methods. *Applications of Geodesy to Engineering*, Symposium No. 108. International Association of Geodesy Symposia. Stuttgart: Springer-Verlag
- López, A., Zapotecas, S., Coello, C. A., (2009) *An Introduction to Multiobjective Optimization Techniques*. Ciudad de México: Nova Science Publishers, Inc.

- Meijers, A. W. M. & De Vries, M. (2009). Technological Knowledge. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), *A Companion to the Philosophy of Technology* (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Moya, R. (1965) Unidad habitacional Nonoalco Tlatelolco tomada desde torre insignia. [Fotografía] Archivo fotográfico de Rodrigo Moya. Ciudad de México: Instituto nacional de Bellas Artes.
- Nakib, A., Oulhadj, H., & Siarry, P. (2010). Image thresholding based on Pareto multi-objective optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(3), 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.09.002>
- Nguyen, A. T., Reiter, S., Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*. 113, 1043-1058.
- Nicholas, P., Tamke, M. (2013). Computational Strategies for the Architectural Design of Bending Active Structures. *International Journal of Space Structures* Vol. 28 No. 3&4 , 215-228.
- Oldenziel, R. (1994). Of Old and New Cyborgs: Feminist Narratives of Technology. *Literature d'America*. 14. 95-11.
- Opensourcedesign.net, (2020) Bringing great design to Open Source Software. Recuperado el 22.octo.2020 de: <https://opensourcedesign.net/#page-top>
- Open Insulin Project (2020) Democratizar el acceso a la insulina. Recuperado el 22.octo.2020 de: <https://openinsulin.org/our-blog/el-proyecto-open-insulin/>
- Otto, F. Henniecke, J. Matsushita, K. Sataka, K. Schaur, E. Shirayanagi, T. Gröbner, G. (1973) IL 10 Gittershalen. *Instituts für leichte Flächentragwerke Zeitschrift #10*, Stuttgart: Univerität Stuttgart.
- Otto, F. Henniecke, J. Matsushita, K. Sataka, K. Schaur, E. Shirayanagi, T. Gröbner, G. (1973) IL 10 Gittershalen. *Instituts für leichte Flächentragwerke Zeitschrift #10*, Stuttgart: Univerität Stuttgart.
- Otto, F. Henniecke, J. Matsushita, K. Sataka, K. Schaur, E. Shirayanagi, T. Gröbner, G. (1973) IL 10 Gittershalen. *Instituts für leichte Flächentragwerke Zeitschrift #10*. Stuttgart: Universität Stuttgart.

- Otto, F. P., Songel, J. M. (2010). *A Conversation with Frei Otto*. New York: Princeton Architectural Press.
- Otto, F., Hennicke, J., Blümel, D., Braun, T., Buckhardt, B., Graefe, R., Gröbner, G., ... Racanello, R. (1975). *IL 8 Netze in Natur und Technik*. Instituts für leichte Flächen-tragwerke Zeitschrift #8, Stuttgart: Univerität Stuttgart.
- Oxman, N. (2010) *Per Formative, Towards a Post Formal Paradigm in Architecture*. *Perspecta the Yale Architectural Journal*, 10 (1) p.1-17. ISSN: 00790958
- Paz, M. F., & Ridsell, N. (2014) *Conflictos, conflictividades y movilizaciones socioambientales en México: problemas comunes, lecturas diversas*. Ciudad de México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM.
- PBS Eons. (2019) *When We First Made Tools*. [Archivo de video] Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=FFI50iSPWeI&ab_channel=PBSEons
- Pirazzi, C., Weinand, Y. (2006) *Geodesic Lines on Free-Form Surfaces - Optimized Grids for Timber Rib Shells*, 9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006, recuperado de: <https://infoscience.epfl.ch/record/118623?ln=en>
- Polthier, K., Schmies, M. (1998, Junio, 3) *Straightest Geodesics on Polyhedral Surfaces*. International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques 2006, Boston: ACM.
- Popescu, M., Rippmann, M., Liew, A., Van Mele, T. & Block, P. (2019). *Concrete shell built using a cable-net and knitted formwork*. *DETAIL structure Volume 1 (2019)*, pp. 10-11.
- Pottmann, H., Huang, Q., Deng, B., Schiftner, A., Kilian, M., Guibas, L., Waller, J. (2010). *Geodesic Patterns*. *ACM Trans.\ Graphics*, Vol 29 #3. Retrieved from: "<http://www.geometrie.tugraz.at/wallner/geopattern.pdf>"
- Powell, M. (2007). *A view of algorithms for optimization without derivatives*. *Mathematics Today-Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications*, 1-12. Recuperado de: http://www.damtp.cam.ac.uk/user/na/NA_papers/NA2007_03.pdf
- Radder, H. (2009). *Science and Technology: Positivism and Critique*. En: Olsen, J. K. B., Pedersen, & S. A., Hendricks, V. F. (Eds.), *A Companion to the Philosophy of Technology* (pp.49-51). Malden, MA: Wiley-Blackwell.

- Rutten, D. (2010, septiembre 24) Evolutionary Principles applied to Problem Solving. Recuperado de: <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>
- Sabera, E. (2016). The floating basket homes of Iraq. [Archivo de imagen] Recuperado el 18 de enero de 2020 de: <https://ciiradio.com/2016/10/11/the-floating-basket-homes-of-iraq/>
- Sampaio, D. (2015, abril, 12). The Captaincy of the "Dymaxegrity"- "Bucky" Fuller. Interactive Architecture Lab, Bartlett School of Architecture, UCL. Retrieved from: <http://www.interactivearchitecture.org/tag/buckminster-fuller>
- Sheil, B., Menges, A. (2017) Introduction, Fabricate 2017 (pp.12-15). London: UCL Press.
- Simondon, G. (1958). Du mode d'existence des objets techniques. Paris, Aubier.
- Tarnai, T. (1995) Geodesic Domes: Natural and Man-Made. International Journal of Space Structures Vol. 26 No. 3.
- Tibbits, S. J. E. (2007) Logic Matter, Digital logic as heuristic for physical self-guided-assembly. (Tesis de Maestría) Department of Computer Science and Department of Electrical Engineering and Computer Science. Massachusetts Institute of Technology.
- Timoshenko, S. & Goodier J. (1951) Theory of Elasticity. (pp:V-21) Stanford: McGraw-Hill Book Company
- Wetter, M., & Wright, J. (2004). A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. Building and Environment, 39(8 SPEC. ISS.), 989–999. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.022>
- Wiener, A. (2017, Diciembre). Inside Adidas' Robot-powered On-demand Sneaker Factory. Get Wired. Recuperado de: <https://www.wired.com/story/inside-speedfactory-adidas-robot-powered-sneaker-factory/>
- Wormann, T., Waibel, C., Nannicini, G., Evins, R., Schroepfer, T., Carmeliet, J. (2017). Are Genetic Algorithms Really the Best Choice for Building Energy Optimization? Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design 2017. Toronto, Canada: Society for Modeling & Simulation International.

- Wortmann, T. (2017). Model-based Optimization for Architectural Design: Optimizing Daylight and Glare in Grasshopper, *Technology|Architecture + Design*, 1:2, 176-185
- Wortmann, T. (2017b). OPOSSUM Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper. *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, (April), 283–293.
- Wortmann, T. (2018). Model-based Optimization for Architectural Design: Optimizing Daylight and Glare in Grasshopper. *Technology|Architecture + Design*, 1(2), 176–185. <https://doi.org/10.1080/24751448.2017.1354615>
- Wortmann, T. (2018b). *Efficient , Visual , and Interactive Architectural Design Optimization with Model-based Methods (Tesis doctoral)*. Singapore University of Technology.
- Wyatt, S. (2016). *Response to Critical Theory of Technology & STS*. Symposium on Critical Theory of Technology & STS. Maastricht University: [archivo de video] recuperado de: <http://www.maastrichtsts.nl/feenberg-video>