

ARQUITECTURA BLANDA

APLICACIÓN DE SOFT ROBOTIC EN EL DISEÑO DE ARQUITECTURA RESPONSIVA-INTERACTIVA

Estudiante: Cristian Aroca, **Profesor guía:** Sebastian Rozas

ABSTRACT:

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un método que pueda integrar arquitectura responsiva e interactiva mediante la aplicación de soft robotic en una fachada. Para lograr este objetivo primero se realizó una revisión de los conceptos principales, arquitectura adaptativa (responsiva-interactiva) y soft robotic. En segundo lugar, se analizaron estudios e investigaciones recientes que hablan de la aplicación de los soft robotic en la arquitectura. Con los conocimientos adquiridos en los análisis y estudios de referente, junto con la ayuda de herramientas de programación y diseño computacional, se desarrolló un prototipo físico escalable que logra integrar ambos tipos de comportamientos adaptativos (responsivo-interactivo) en un solo sistema robótico híbrido (blando-rígido), demostrando la potencialidad de los soft robotic en la arquitectura, en este caso siendo aplicado para ser sensible y actuar a los cambios de temperatura producidos por la radiación solar.

1_INTRODUCCIÓN

1 Medina, J., & Vélez, P. (2014). "Soft Robotic": Una nueva generación de robots. *Maskana*, 5, 109-118.

2 Al Faleh, Omar (2017). *Responsive Architecture: A Place Making Design Strategy*. Masters thesis, Concordia University.

Este seminario indaga en la intersección de tres áreas generales, la arquitectura de comportamiento adaptativo, los materiales blandos y la robótica. **Siendo específicamente el área de investigación la arquitectura responsiva e interactiva mediante la implementación de los Soft robotic.**

Para comenzar con este estudio es pertinente definir los dos conceptos principales que componen esta investigación, con el fin introducirlos y comprender de mejor manera estas nuevas áreas de la arquitectura y la robótica.

(a) La **arquitectura adaptativa** es un campo en evolución de la práctica arquitectónica y la investigación que se ha estado desarrollando en conjunto con las nuevas tecnologías aplicada a la arquitectura (domotica, materiales inteligentes, impresión 3d), avances en la informática (programación, software de diseño computacionales, entre otros) y robótica (sensores y microcontroladores) durante los últimos 20 años. **La arquitectura adaptativa se puede definir más precisamente como cualquier edificio o componente de edificio que tiene un comportamiento adaptativo, ya sea al exterior (responsivo) como al interior (interactivo) de este.**

(b) Los **soft robotic** son un nuevo sub-campo de la robótica que se dedica al estudio

y creación de robots que contienen componentes suaves o blandos, estos componentes en combinación con mecanismos de actuación permiten variar su forma y rigidez, cambiar sus propiedades superficiales y/o facilitar la detección de formas (Medina y Vélez, 2014)¹ de manera que tienen una gran capacidad de adaptarse para realizar diferentes tipos de tareas.

En la actualidad los sistemas adaptativos utilizados, en su mayoría solo responden a una variable externa, por ejemplo, los cambios climáticos (responsivo), dejando de lado la variable interna (medio interno) en donde el uso del espacio y el comportamiento humano es relevante. **La interactividad comúnmente está presente en los sistemas adaptativos de forma indirecta. Como en la mayoría de los casos la respuesta del sistema adaptativo es unidireccional, es decir solo responde al exterior o interior (no a ambas), la interacción que esta asociada al usuario pasa a segundo plano, por lo cual no hay una relación directa entre responsividad e interacción.** La implementación de los soft robotic en la arquitectura de comportamiento adaptativo surge como una oportunidad para investigar como las propiedades de los materiales blandos pueden aportar a mejorar las posibilidades de involucrar a los habitantes del lugar en un intercambio interactivo directo entre ellos y su entorno construido (Al Faleh, O, 2017)².

3_Dickey, R. (2017). Soft Systems: Rethinking Indeterminacy in Architecture as Opportunity Driven Research. In R. Dickey (Ed.), *Protocols, Flows and Glitches*, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) (pp. 811–821).

4_de Queiroz Nome, N., Carvalho, J. M., Verzola Vaz, C. E., & Nome, C. A. (2018). Pared cinética: Una fachada humana y ambientalmente responsiva. Un enfoque de educación en arquitectura. *Arquitecturas Del Sur*, 36(54), 58–69. <https://doi.org/10.22320/07196466.2018.36.054.05>.

En el artículo *Soft Systems: Rethinking Indeterminacy in Architecture as Opportunity Driven Research* (2017) ³ Dickey R, mediante una recopilación de investigaciones recientes, utiliza el concepto **indeterminable** para referirse a los materiales blandos por sus propiedades deformativas, no-lineales y poco predecibles, Así mismo **propone replantear que aquella indeterminación del material visto comúnmente como un elemento de azar por su forma cambiante y de carácter alterable, sea visto más que como un obstáculo, como una oportunidad de diseño y de estudio respecto a la indeterminación con relación al comportamiento humano (Dickey R, 2017) como una posibilidad de interacción.**

Entonces, **este seminario buscara el cruce de la arquitectura y los soft robots, con el objetivo de aportar en el desarrollo de arquitectura responsiva e interactiva —que hoy es escasa— a través del estudio de los sistemas robótico blando y sus propiedades materiales** como medio para llegar a integrar en un solo sistema ambos comportamientos (responsivo e interactivo).

Dado lo anterior, surge la pregunta **¿Cómo desarrollar un sistema robótico blando que sea capaz de integrar un comportamiento responsivo e interactivo?**

2_ ANTECEDENTES

2.1_Arquitectura adaptativa

La **arquitectura adaptativa** en palabras de Omar Al Faleh, es la **intersección entre la arquitectura, el diseño y la tecnología** ², es decir, es un campo de diseño arquitectónico que se beneficia de la tecnología para crear sistemas autónomos capaces de adaptarse al medio al que va enfrentado (responsivo o interactivo).

En terminos practicos, **cuando la arquitectura adaptativa es ambientalmente responsiva puede ayudar a controlar y reducir el consumo energético de un edificio aprendiendo y respondiendo a patrones climáticos mediante cambios morfológicos en el edificio**, promoviendo

una arquitectura más sustentable.

El desempeño energético es parte del fin funcional de la arquitectura adaptativa, pero también lo son la protección de agentes medioambientales (lluvia, viento, contaminación, etc.), el confort (térmico, lumínico, calidad de aire, etc.), además de las consideraciones estéticas de la fachada o el elemento arquitectónico que se busca que sea adaptativo, por lo que estos sistemas son inherentemente complejos. (de Queiroz Nome et al., 2018)⁴ debido a las variables y procesos que se deben tener en cuenta en su concepción.

Si bien es cierto que hoy en día el enfoque principal de la arquitectura adaptativa tiene que ver con una mirada medioambiental y de eficiencia energética, **los sistemas adaptativo hasta fines del siglo XX y principios del XXI tenían que ver más con elementos estéticos, temporales e interactivos** que buscaban demostrar la potencialidad de estos sistemas, que con algo funcional y permanente en un edificio.

En general los sistemas adaptativos pueden ser clasificados según la variable a la que responden (si responden al medio externo o al medio interno), según el tipo de sistema (fachada, iluminación, acústica, etc.) y su forma de activación (si es activa o pasiva dependiendo del uso o no uso de energía eléctrica).

Como se puede observar en la **tabla 1**, de los sistemas adaptativos analizados la tendencia es a responder solo a un medio (medio externo), tener una activación que requiere energía eléctrica constante, ser rígidos, y en donde las personas no participan directamente de la activación (interactividad). De los 6 referentes, exclusivamente uno busca responder a ambos medios, esto debido a que Kiefer Technic Showroom (2007) **posee un control local** de sus placas, lo que permite que las personas puedan manejar el nivel de apertura de la fachada en espacios específicos. Algo similar ocurre (control local) con el kinetic wall (2018), que es un muro interactivo.

Nombre del proyecto	Tipo de sistema adaptativo	Materialidad	Tipo de accionamiento	Activación con/sin uso e. electrica	Tipo de Interacción usuario	Variable a la que responde (Medio externo-interno)
Instituto del Mundo Árabe <i>Ateliers Jean Nouvel</i> 1987	Fachada cinetica	Rigido	Diafragma biomecanico	Activa	No participa	Medio externo
Kiefer Technic Showroom <i>Ernst Giselbrecht + Partner</i> 2007	Fachada cinetica	Rigido	Placas Electrico	Activa	Participa	Medio externo Interno (usuario)
Media-TIC <i>Cloud 9</i> 2007	Fachada cinetica	Blando	Neumatico	Activa	No participa	Medio externo
Al Bahar Towers <i>AEDAS Architects</i> 2012	Fachada cinetica	Rigido	Placa Electrico	Activa	No participa	Medio externo
Breathing Skins Project <i>Tobias Becker</i> 2016	Fachada cinetica	Blando	Neumatico	Pasiva	No participa	Medio externo
Kinetic Wall <i>Leva</i> 2018	Muro cinetica	Rigido	Placa Electrico	Activa	Participa	Interno (usuario)

Tabla 1_Referentes adaptativos **2.2_Soft Robotic**

5_ Whitesides, G. M. (2018, April 9). *Soft Robotics*. *Angewandte Chemie - International Edition*. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/anie.201800907>

6_Medina, J., & Vélez, P. (2014). "Soft Robotic": Una nueva generación de robots. *Maskana*, 5, 109-118.

7_ Majidi, Carmel. (2014). *Soft Robotics: A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future*. *Soft Robotics*. 1. 5-11. 10.1089/soro.2013.0001.

Dentro de la robótica existen dos categorías en las que se pueden clasificar los robots según la materialidad con la cual están construidos, los de materiales duros y los suaves o blandos. La robótica dura o rígida representa al común de los robots que tenemos en nuestro imaginario al escuchar la palabra, ese que está hecho en su mayoría de metal, con articulaciones y mecanismos complejos hechos también de materiales rígidos. Comúnmente los robots rígidos funcionan mediante actuadores eléctricos (motores y solenoides) o con fluidos presurizados (neumática o hidráulicamente). **La robótica blanda a diferencia de la rígida y como su nombre lo indica, está hecha de materiales blandos y flexibles que tienen la capacidad de deformarse fácilmente, lo que los hace versátiles, adaptables, eficientes y seguros a la interacción humana** ⁵.

Según Medina y Vélez (2014)⁶ actualmente **podemos identificar dos en-**

foques con los que se trabaja la idea de "suavidad" en el ámbito robótico.

El primer enfoque consiste en el uso de robots convencionales (rígidos) que han sido modificados con partes suaves con el objetivo de tener un comportamiento más seguro, ya que comparten espacio de trabajo con personas. Tales son los casos de los robots manipuladores de alimentos con pinzas suaves presentes en la industria alimentaria.

El segundo enfoque, más radical que el anterior, trata de los robots intrínsecamente blandos, es decir que tanto su cuerpo como actuadores están compuestos por materiales suaves cuyo módulo de elasticidad está en el orden de 10^2 - 10^6 Pa, es decir entre 3 y 10 veces menos rígidos que los robots convencionales (Majidi, 2014) ⁷.

Este enfoque es posible por los avances en las últimas décadas en tecnologías como impresiones 3D y 4D, materiales inteligentes con memoria de forma, me-

8_Whitesides, G. M. (2018, April 9). Soft Robotics. *Angewandte Chemie - International Edition*. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/anie.201800907>

F.1_Festo. (2020, 22 abril). Festo's DHEF gripper, modeled on a chameleon's tongue, partially engulfs objects to pick them up. [Fotografía]. *The American Society of Mechanical Engineers*. <https://www.asme.org/topics-resources/content/seven-big-advances-in-soft-robotic-grippers>

F.2_Kooser, A. (2019, 7 mayo). Esta primera versión de un robot blando tiene mucho potencial como explorador espacial. [Fotografía]. *CNET*. <https://www.cnet.com/news/nasa-eyes-soft-robots-for-dirty-jobs-on-the-moon-and-mars/>

F.3_Martínez, R. (2014, 9 agosto). Una extremidad robótica en forma de tentáculo sujeta una flor en una prueba en el laboratorio. [Fotografía]. *Materia*. <http://esmateria.com/2014/08/09/robots-pulpo-una-nueva-generacion-de-robots-blandos-esta-en-camino/>

ta materiales y actuadores neumáticos. **Actualmente, en la práctica el primer enfoque es el más usado, debido a que la mayoría del desarrollo de los soft robotic está centrado en actuadores y componentes blandos que complementan máquinas complejas rígidas** generando una robótica híbrida. El uso de componentes blandos en robots rígidos es una buena idea teniendo en cuenta algunas limitaciones que estos tienen. Según Whitesides (2018)⁸ podemos reconocer elementos de los cuales los robots rígidos carecen y que pueden ser complementados o en su defecto abarcados en totalidad con soft robotic. Entre ellos se encuentra la poca colaboración y compatibilidad con los humanos, la poca simplicidad lo que lleva a altos costos de construcción, y la poca eficiencia termodinámica que en consecuencia

pueden traer altos uso energético.

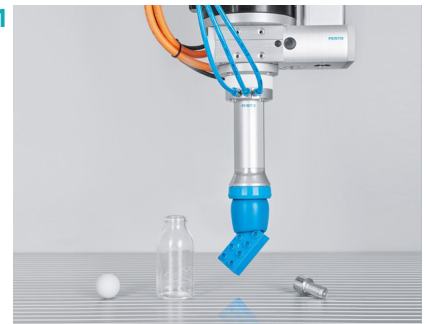
Una de las características principales de los soft robotic es su búsqueda de inspiración en organismos vivos. Lo que podemos ver en la naturaleza es que la mayoría de los organismos vivos son suaves sobre todo los que su cuerpo se compone de una estructura que es de fácil deformabilidad como lo son los gusanos, pulpos, estrellas de mar, medusas, etc. Esto les permite realizar movimientos complejos de una manera sencilla, pudiéndose adaptar a diferentes tipos de situaciones a las cuales se ven obligadas por el medio.

Debido a esto y a lo relativamente fácil que es fabricar actuadores neumáticos que simulan formas orgánicas es que podemos encontrar mayormente soft robotic con formas que imitan animales o a partes de ellos.

Ejemplos de soft robotic con inspiración biológica

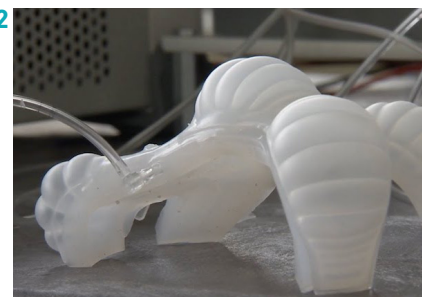
Soft robotic híbrido, brazo rígido y pinza neumática, inspirada en la lengua de un camaleón, que envuelve parcialmente los objetos para recogerlos. Extraída de Festo.com

F.1



Soft robotic desarrollado por la NASA que imita a un cuadrúpedo para ser usado en posibles trabajos en misiones a la luna y marte. El robot está hecho de celdas neumáticas, lo que le permite gran flexibilidad y adaptabilidad al medio.

F.2



Una extremidad robótica en forma de tentáculo sujeta una flor en una prueba en el laboratorio. El tentáculo está hecho de materiales plásticos de distinta rigidez, que al inflarse se enrollan alrededor del objeto. / R. Martínez

F.3



F.4 Procesos de fabricación de un soft robotic. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Proceso de fabricación de un soft robotic

El proceso de creación y fabricación de un soft robotic puede estar dividido en 4 etapas, diseño, materiales blandos, actuadores y activación, de los cuales se desprenden subsistemas que se traslapan en algunas de las cuatro etapas del proceso de diseño y fabricación de un soft robotic.

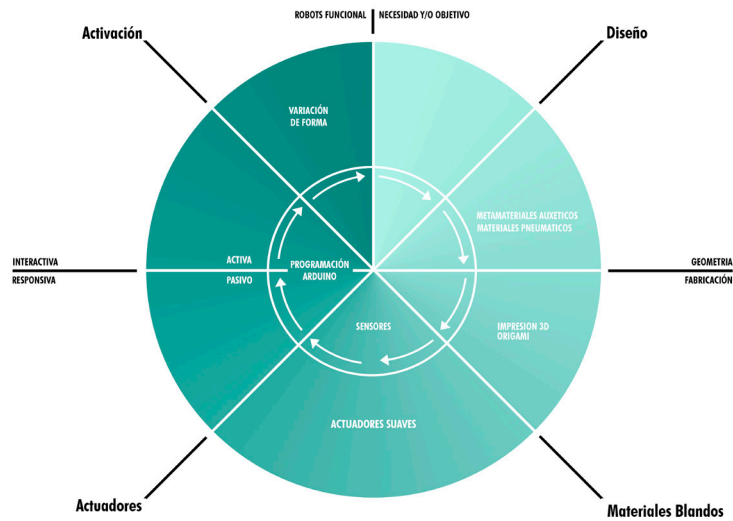
Diseño y materiales blandos

Lo primera etapa es identificar la necesidad y/o objetivo para la cual será funcional. En esta parte podemos determinar la geometría, forma y materialidad, por lo que va en directa relación con la segunda etapa que es fundamental en un robot suave, los materiales blandos. Es muy

común encontrar soft robotic contruidos de materiales neumáticos fabricados con un elastómero (que suele ser ecoflex 00-50) a partir de moldes hechos en impresión 3D. Con esto, se busca generar músculos neumáticos a partir de celdas diseñadas en el molde, las que luego se rellenaran con aire para su activación. Este método de fabricación de soft robotic tiende a ser el más usado debido a su bajo costo y la sencillez del proceso.

Actuadores y activación

La tercera parte son los actuadores, que son los mecanismos generadores de movimiento de los robots. Como mencionamos anteriormente, el enfoque más usado en cuanto a la utilización de materiales soft en la robótica tiene que ver más con la creación de robots híbridos,



F.4

que se componen tanto de materiales blandos como rígidos. Por esto es que hay que reconocer dos tipos de actuadores, los rígidos y los suaves. Algunos de los actuadores rígidos más comunes que podemos encontrar, por ejemplo, son los servomotores, solenoide, pistones, entre otros.

Actuadores blandos

En los actuadores blandos podemos encontrar dos grandes grupos, los actuadores eléctricos y los neumáticos. Los actuadores eléctricos (EAP) se basan en polímeros electro activos, que son fa-

bricados con materiales inteligentes, los cuales al ser sometidos a un estímulo eléctrico se obtiene como respuesta una deformación en el material. En esta categoría también podemos encontrar a las aleaciones con memoria de forma, es decir, metales que al ser sometidos a cambios térmicos pueden variar su forma, rigidez y elasticidad y una vez el estímulo cese, el material volverá a su estado inicial. En este tipo de actuadores con memoria de forma, el más común es el nitinol, que es una aleación de níquel y titanio usado desde la robótica hasta la odontología.

9_Medina, J., & Vélez, P. (2014). "Soft Robotic": Una nueva generación de robots. *Maskana*, 5, 109-118.

10_Rus, D., & Tolley, M. T. (2015, May 27). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*. Nature Publishing Group.

El funcionamiento de los actuadores neumáticos blandos o PneuNets se basa en una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero, estos canales se inflan al ser presurizados generando movimiento (Medina y Vélez, 2014)⁹. sin necesidad de energía eléctrica.

Dentro de los actuadores neumáticos también podemos encontrar los PAM o músculo artificial neumático, estos actuadores funcionan de la misma manera que los PenuNets, pero con la diferencia que los PAM funcionan al vacío, generando movimientos retráctiles que simulan músculos biológicos. Los actuadores dan paso a la activación de los robots y como consecuencia de eso ocurre una variación de forma, en ocasiones deforma radical, más aún cuando se trata de un soft robotic intrínsecamente blando. Esta variación de forma corresponde a una de las características principales de este tipo de

robótica, gracias a las propiedades no lineales de los materiales blandos.

La activación de un soft robotic puede ser tanto activa como pasiva, es decir con o sin energía eléctrica. Si el robot requiere de una fuente constante de energía es muy probable que requiera de una programación que controle su funcionamiento y para esto es necesario un conjunto de elementos que acompañan y complementan al soft robotic, como microcontroladores, sensores y software.

Se debe aclarar que cuando se habla de soft, suave o blando, nos referimos al cuerpo del robot. Un soft robotic puede contener en su cuerpo blando todos los subsistemas que contendría un robot rígido convencional, tales como un sistema de actuación, un sistema de percepción, elementos electrónicos de conducción y un sistema computacional (Rus & Tolley, 2015)¹⁰.

2.3_Aplicación de soft robotic en la arquitectura

F.5_ Sistema que controla la propagación del sonido mediante celdas neumáticas.

F.6_ Sistema neumático que se infla para impedir el paso de la luz.

F.7_ Piel robótica blanda capaz de modular la transferencia térmica.

Imágenes extraídas de:

11_Decker, M. (2015). *Soft Robotics and Emergent Materials in Architecture*. ECAADe 2015: Real Time - Proceedings of the 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2, 409-416. Retrieved from http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2015_178

2.3.1_Soft Robotics and Emergent Materials in Architecture Martina

Martina Decker
2015

La autora Martina Decker explora como la robótica blanda adaptativa promete abordar muchos problemas en entornos arquitectónicos, como la eficiencia energética, la comodidad y la seguridad del usuario.

El estudio se desarrolla bajo la premisa de que los materiales blandos pueden variar de forma o volumen gracias estímulos como corrientes eléctricas, composición química, luz solar o cambios de temperatura, las que también pueden provocar otros cambios en el material como por ejemplo que emitan luz o que su color cambie.

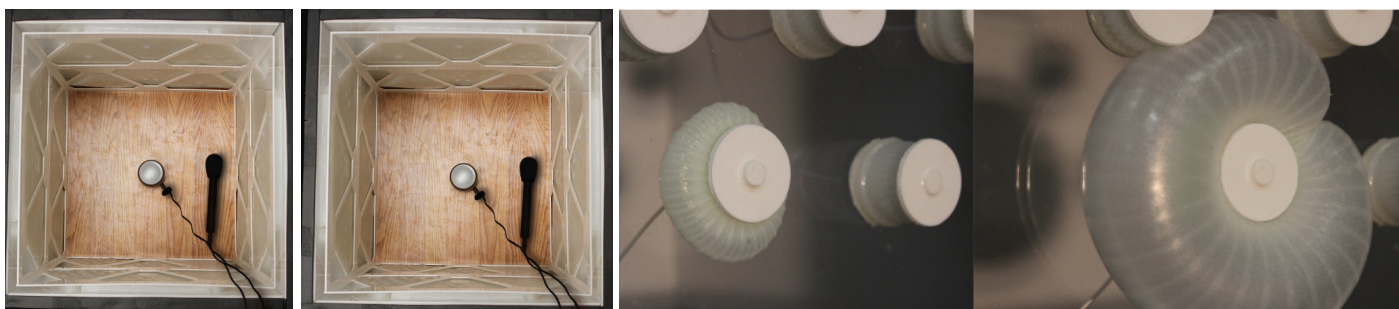
En la parte experimental de esta investigación, los autores exploran el potencial

de los sistemas robóticos blandos en la arquitectura mediante la creación de tres prototipos experimentales que se basan en actuadores neumáticos para su funcionamiento.

El primero trata un sistema que controla la propagación del sonido en ambientes interiores gracias a celdas neumáticas que forman una superficie porosa irregular que afecta la propagación del sonido **F.5**.

El segundo experimento trata de una fachada que puede controlar el ingreso de luz a una habitación gracias a un sistema robótico blando que al activarse cubre los vanos impidiendo el paso de la luz **F.6**.

El tercer experimento llamado Soft Barrier es un sistema robótico blando que puede manipular la transferencia térmica a través de un módulo que forma una piel blanda **F.7**.



F.5

F.6



F.7

F.8_Esqueleto de la piel responsiva hecha de MDF y cuerdas de caña de pescar.

F.9_prueba de contracción y expansión del resorte SMA a través de corriente eléctrica para accionar la transformación morfológica global del prototipo

F.10_Experimentación de las transformaciones morfológicas de piel cinética digital y física ante la luz

Imágenes extraídas de: Khoo, C. K., Burry, J., & Burry, M. (2011). Soft responsive kinetic system: An elastic transformable architectural skin for climatic and visual control. In *Integration Through Computation - Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2011* (pp. 334–341).

2.3.2_Soft Responsive Kinetic System an elastic transformable architectural skin for climatic and visual control

Chin Koi Khoo, Jane Burry, Mark Burry 2011

Esta investigación explora las posibilidades de los sistemas blandos que cambian de forma, con el objetivo de minimizar el uso de componentes mecánicos (duros) en fachadas responsivas cinéticas. Los autores desarrollaron un prototipo de sistema suave transformable que puede utilizarse como segunda piel en un edificio existente y que es responsivo a diversas condiciones climáticas.

La fase experimental de esta investigación concluyo con un prototipo de fachada responsiva llamada "the curtain" la cual contó con 4 fases de desarrollo.

1_La primera fue el desarrollo de un esqueleto simple y liviano hecho de placas de MDF y cuerdas de caña de pescar **F.8**, el montaje utiliza el principio de tengresidad para formar la estructura del esqueleto.

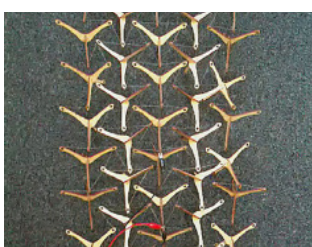
2_La piel de "the curtain" consiste en un

material blando y elástico que permite la deformación, en este caso se trata de espuma. En esta fase es importante que el material no sea conductor eléctrico.

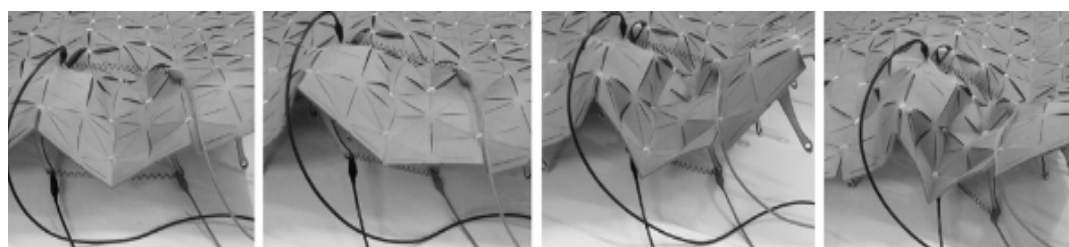
3_La transformación de la piel se da gracias a un resorte SMA que sirve como actuador **F.9**. Al aplicarse una corriente eléctrica el resorte aumenta de temperatura expandiéndose y luego contrayéndose cuando el estímulo deja de aplicarse.

4_La responsividad en primera instancia se probó en un modelo digital gracias a plying como grasshoper y firefly, en segunda instancia, para el modelo físico, se sumaron a estos software, un controlador Arduino, sensores de luz y potenciómetros con el fin de captar las condiciones ambientales a las cuales responderá la fachada **F.10**.

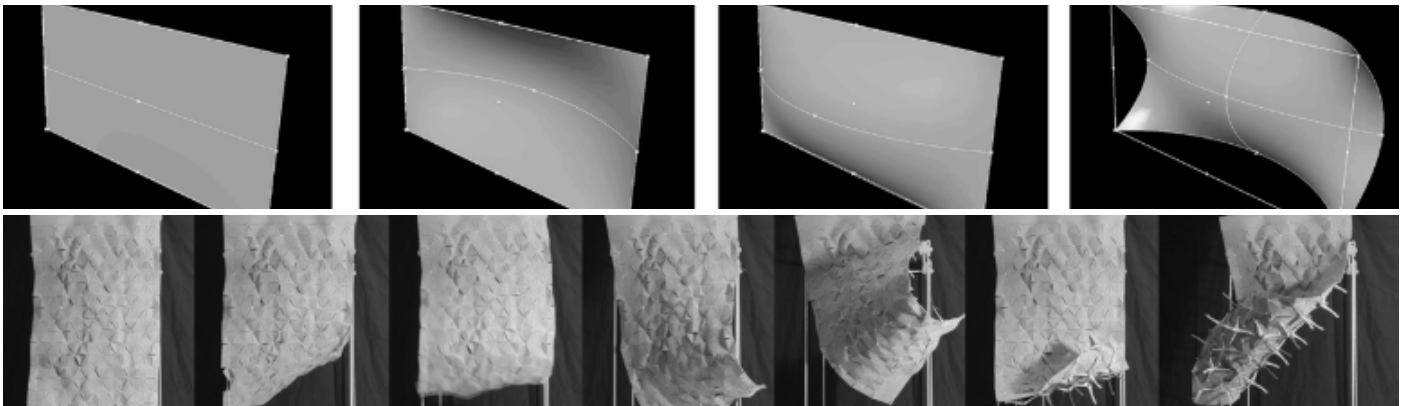
El objetivo del modelo paramétrico es ser una piel de tensegridad elástica que responda activamente al entorno con una serie de características como flexibilidad, imprevisibilidad y transformación no lineal.



F.8



F.9



F.10

F.11_ Variaciones de forma del prisma de 30x30 en T al ser sometidos a diferentes compresiones y tensiones.

F.12_ Posibles transformaciones en la superficie de la fachada cinética.

Imágenes extraídas de:
13_Abdelmohsen, S., Massoud, P., & Elshafei, A. (2016). **Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive.** Complexity & Simplicity - Proceedings of the 34th ECAAD Conference, 1, 529–536.

2.3.3_Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive

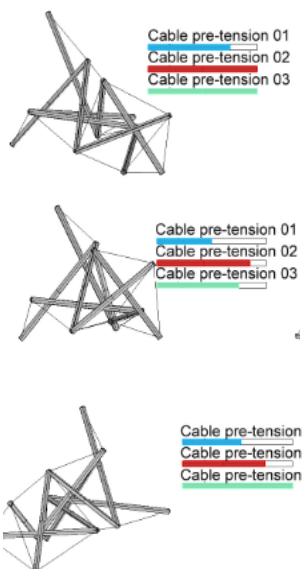
Sherif Abdelmohsen, Passaint Massoud, Ahmed Elshafei
 2011

Este artículo describe el proceso de diseño de un prototipo de sistema responsivo suave para una fachada cinética de un edificio. Al combinar conceptos derivados de estructuras de tensegridad y mecanismos de plegado (origami), Los autores desarrollaron un prototipo que cambia dinámicamente su forma para producir diferentes patrones y perforaciones basados en datos y retroalimentación de una red de sensores que miden los cambios del medio externo.

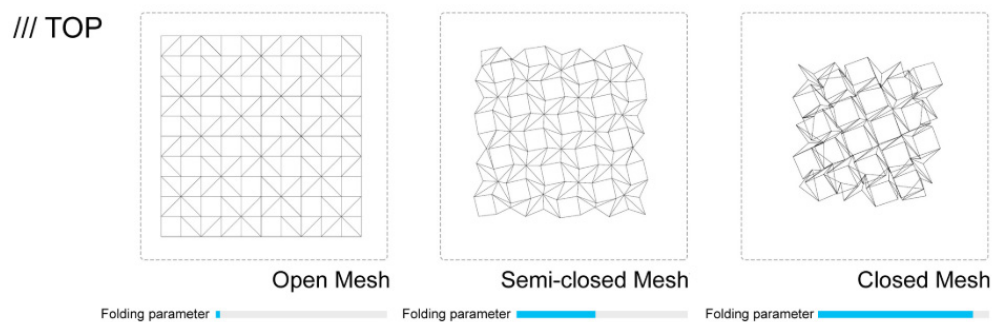
El proceso de desarrollo de un prototipo comenzó con la experimentación digital de los principios de tensegridad para conocer las posibilidades y limitaciones en las transformaciones de este tipo de estructuras. En la prueba inicial se utilizó un prisma en T de 3 puntales de 30x30x50cm al cual, a través del software rhinoceros y los plying grasshopper y Kangaroo, se

simuló el comportamiento del prisma en T al ser sometido a distintas tensiones y compresiones^{F.11} con el fin de identificar variables paramétricas con las cuales responder a las variables climáticas.

La construcción del prototipo consistió en una estructura en tensegridad cubierta por una maya de material blando fácilmente plegable con el objetivo de responder a los cambios de la estructura al momento de la activación. Aleaciones de memoria de forma se usan para los cables pretensados de la estructura por lo que al aplicarse una corriente eléctrica a uno o más cables estos se expandirán o contraerán operando como actuadores locales en la transformación del prototipo. Estas transformaciones se controlan a través de un microcontrolador Arduino más sensores de radiación los cuales en apoyo de los plying DIVA y ladybug miden las condiciones ambientales a las cuales responderá el prototipo de fachada cinética, lo que da como resultado tres escenarios de transformación posibles, malla abierta, malla semicerrada y malla^{F.12}.



F.11



F.12

F.5 Tipos de movimientos de la fachada responsiva. Fuente: Elaboración propia.

3_METODOLOGIA

Este estudio está comprendido por dos procedimientos metodológicos, el primero de recopilación de antecedentes, estudio de referentes y revisión de investigaciones. Y el segundo exploratorio experimental.

1_En la primera etapa fueron estudiado y analizado referentes de sistemas responsivos e interactivos, con el objetivo de encontrar variables tanto de respuesta, forma, movimiento, Funcionamiento y finalidad, las cuales den indicios de como debe ser un sistema integrado responsivo-interactivo. Además, se revisaron investigaciones recientes de distintas aplicaciones de soft robotic en la arquitectura. Estos se analizaron desde dos puntos de vista, el proceso metodo-

lógico de trabajo de las investigaciones y desde el estudio del uso de los materiales blandos en sistemas adaptativos arquitectónicos y las herramientas de diseño computacional. Con la finalidad de determinar el diseño, la materialidad y el método de actuación de un prototipo funcional en la segunda parte del trabajo.

2_En la exploración experimental se buscó desarrollar el objetivo principal de este estudio. Este consiste en desarrollar un método que integre un comportamiento responsivo e interactivo en un sistema robótico híbrido, esto mediante la elaboración de un modelo digital funcional y un prototipo físico de una fachada responsiva al comportamiento humano mediante gestos, movimientos y a la misma vez a la trayectoria del sol.

4_EXPERIMENTACIÓN

Tomando los referentes anteriores, se escogió una fachada como caso de estudio. La fachada es el lugar en donde se encuentran respuestas tanto al exterior, como al interior. Esto la convierte en una frontera entre ambos medios, propiciando un gran potencial para integrar un comportamiento adaptativo desde el punto de vista responsivo e interactivo.

La etapa experimental fue llevada a cabo en dos partes. La primera se exploró y desarrollo el uso de movimientos y gestos para interactuar con la fachada desde el interior. En la segunda etapa se trabajó la parte de la fachada que debe responder al medio externo, en este caso a la trayectoria del sol mediante la radiación solar y los cambios de temperatura.

4.1_Diseño de la fachada

Se entiende la fachada como una piel que puede tener un entramado geométrico (retícula) compuesto de módulos que permiten respuestas responsivas e interactivas. En este caso, el diseño que se trabajó es una retícula ortogonal compuesta

por rombos adaptativos.

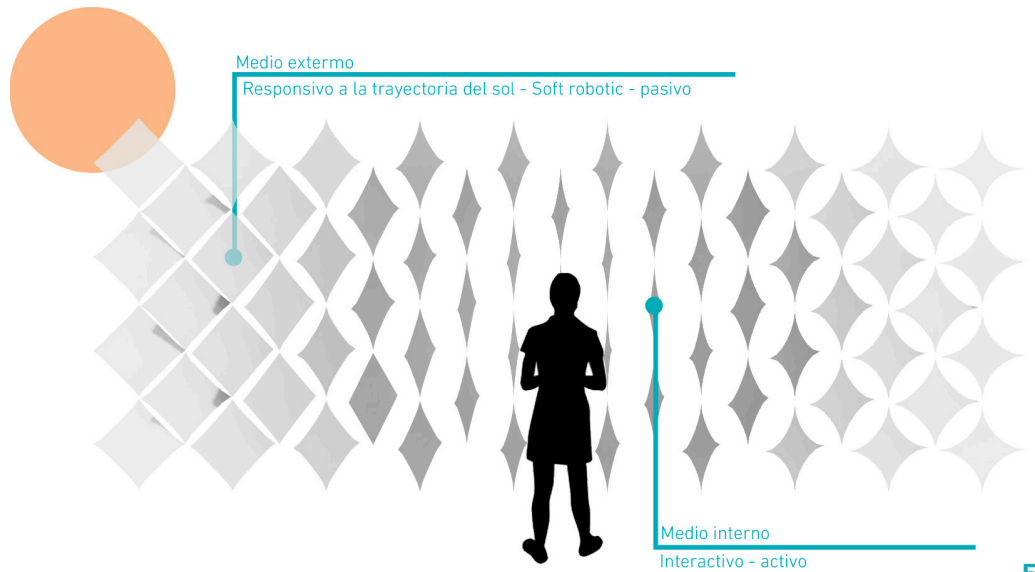
Se pudo observar en los referentes adaptativos, únicamente respondían a una variable, ya sea a un medio externo o interno, lo que en términos de tipos movimientos realizados se reducía todo el tiempo a uno, abrir o cerrar, arriba o abajo, entre otros. Por lo tanto, para el diseño de esta fachada era importante **integrar dos tipos de movimientos distintos**^{F.13}, destinados uno para responder a la trayectoria del sol y los cambios de temperatura asociados a este, y otro para las interacciones humanas.

Como la rícula está diseñada para integrar un comportamiento responsivo y otro interactivo, los movimientos van en respuesta a ellos^{F.14}. En el caso del movimiento de desplazamiento se asoció a la trayectoria del sol. Esto debido a que el tipo de apertura que genera en la fachada es menor en comparación al rotar el módulo en 90°, por lo que permite un control más preciso de los rayos del sol hacia el interior.

En el caso de la interacción era importante que el nivel de apertura fuera mayor, debido a que en primera instancia la rela-

F.13 Forma de comportamiento del sistema responsivo e interactivo. Fuente: Elaboración propia.

F.14 Tipos de movimientos de la fachada adaptativa. Fuente: Elaboración propia.



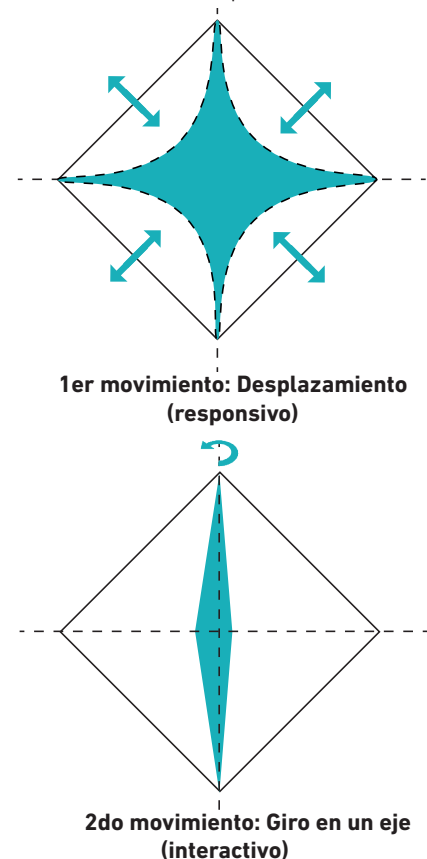
F.13

ción más directa entre una fachada y una persona, es la acción de poder mirar a través de ella. Otro aspecto fundamental del diseño es que, como se pudo observar en referentes adaptativos, las fachadas en términos de energía eran activas, es decir, requerían de energía eléctrica constantemente para funcionar. **De esta forma se buscó que la acción de responder al medio externo sea pasiva, particularmente por dos razones, disminuir la complejidad del sistema y un ahorro energético.** Estas condiciones hacen ideal el uso de soft robotic y elementos blandos en la parte responsiva del proyecto.

Las interacciones van ligadas a otro tipo de factores y elementos que requieren un constante suministro de energía eléctrica, como por ejemplo los sensores que capturaran los movimientos de las personas y los controladores que procesaran y darán órdenes a la fachada de como debe actuar en función de una programación. **De esta manera se darán diferentes tipos de integraciones o hibridaciones en una misma fachada, pasivo/activo, Robotic/Soft robotic y Responsivo/interactivo.**

En esta etapa del trabajo fue imprescindible el uso de herramientas de diseño computacional y de simulación. Para la construcción del modelo digital se emplearon técnicas de modelado algorítmico y paramétrico a través del software rhinocero-

ros junto al plug-in Grasshopper. Además, se utilizaron plug-ins de simulación como ladybug, que extrae datos ambientales reales y kangooros 2 que permite realizar una simulación de elementos blandos. Esto es importante debido a que la parte responsiva del proyecto es la que integra soft robotic y materiales blando. El trabajo en conjunto de ambos plug-in permite simular el comportamiento de la fachada (soft robotic) ante la posición del sol.



F.14

F.15 Hibridación de diferentes elementos electrónicos. Fuente: Elaboración propia.

4.2_Comportamiento interactivo

Las interacciones requirieron un flujo de trabajo mediante la hibridación de diferentes dispositivos, para asegurar que las interacciones se vean reflejadas tanto en el modelo digital como en el prototipo físico^{F.15}. De esta manera el dispositivo a cargo de capturar las interacciones fue una kinect. Kinect es un sensor diseñado para la antigua consola de juegos Xbox 360, que posteriormente se le entregó soporte y compatibilidad con PC. La decisión de optar por este sensor y no por otro, como por ejemplo un sensor ultrasónico, paso porque en primer lugar kinect incluye 3 sensores, láser IR, cámara RGB y cámara de profundidad, además de

incorporar micrófonos. Esto permite una detección precisa tanto del espacio como del movimiento. Lo interesante de la kinect además de sus sensores, es que es compatible con el plug-in firefly de grasshopper lo que permite detectar la presencia humana a través de un esqueleto representado en rhinoceros. Firefly a través de grasshopper es esencial en esta etapa del trabajo, debido a que además de ser compatible con kinect, es el que permite tener un flujo directo entre el modelo digital y el Arduino. Gracias a informaciones de giros (ángulos) obtenidos desde el modelo digital se puede dar la orden a un servomotor para que haga exactamente el mismo movimiento, todo esto a través de la conexión firefly-Arduino.



F.15

4.2.1 Tipo de interacciones

Las interacciones se dividieron en dos tipos, gestual y automática. Las interacciones gestuales son aquellas que requieren de un movimiento voluntario para poder abrir o cerrar la fachada, a diferencia de las automáticas en donde la fachada se abre o cierra dependiendo de la presencia de la persona, sin la necesidad de algún gesto en específico.

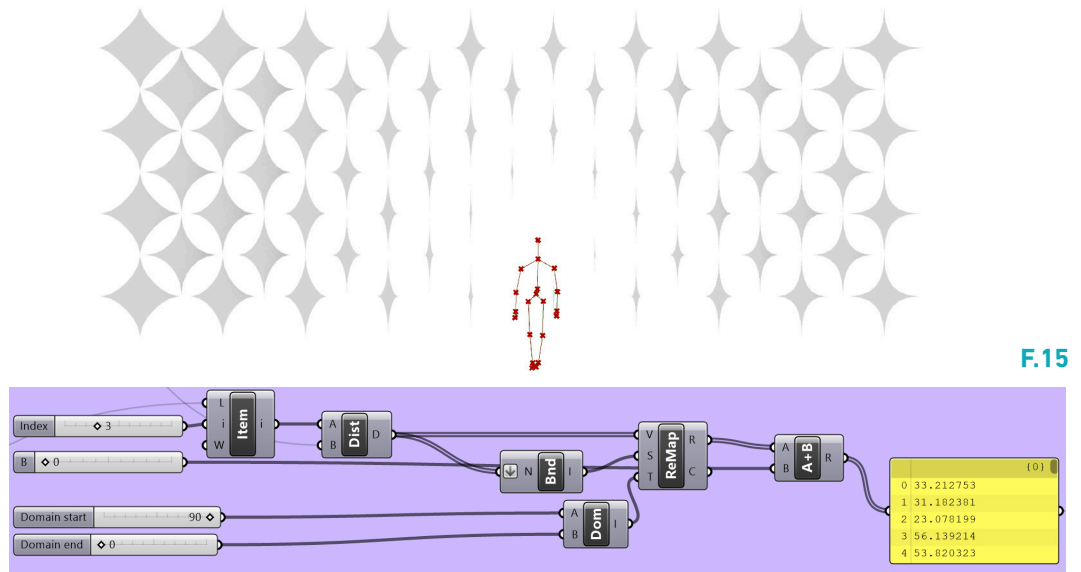
Además, se exploraron los movimientos gestuales desde una plataforma de control manejada desde dispositivos móviles. Esto para mejorar el control del sistema (abrir y cerrar la fachada) y hacerlo práctico al momento de elegir cuál interacción usar, sin tener que recurrir al software de programación.

Interacciones automaticas

F.15_Primer interacción:
atractor a la altura de la cabeza

F.16_El script establece la cabeza del usuario como un punto atractor, abriendo la fachada en un parámetro de entre 0 y 90° en consecuencia de la distancia entre la cabeza y los centros de los módulos de la fachada. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

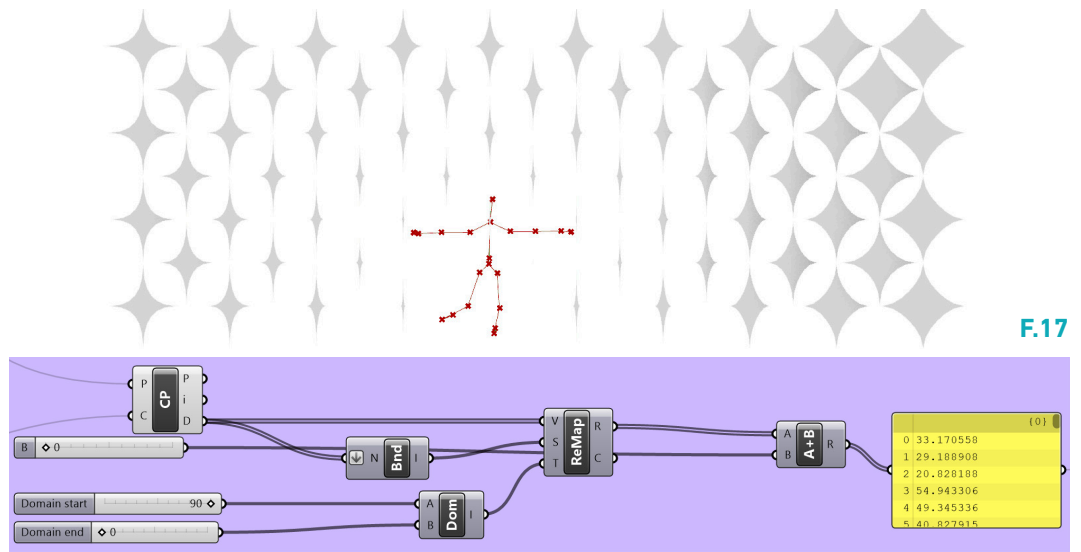


F.15

F.17_Segunda interacción:
atractor en todo el cuerpo

F.18_El script establece todo el cuerpo del usuario como un punto atractor, abriendo la fachada en un parámetro de entre 0 y 90° en consecuencia de la distancia entre el cuerpo y los centros de los módulos de la fachada. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

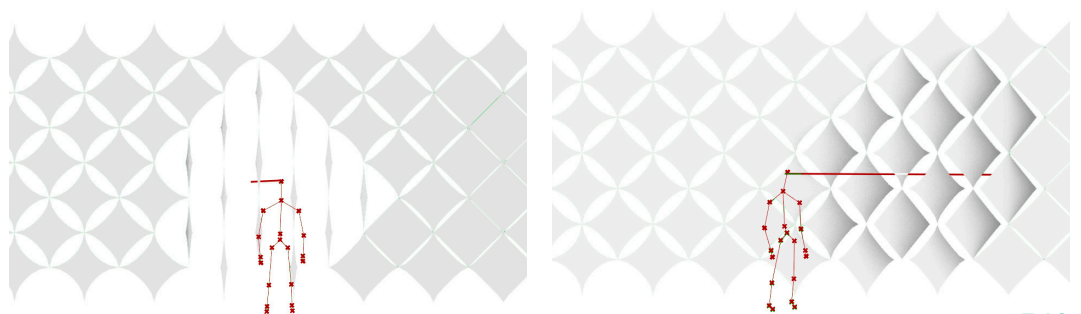


F.16

F.17

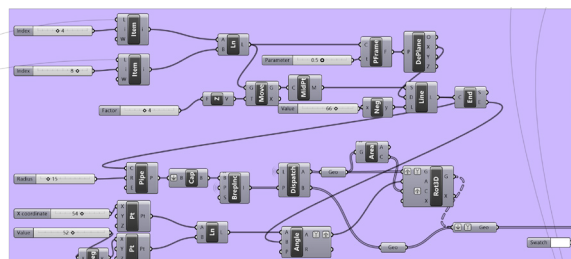
F.19_Tercera interacción:
Angulo de mirada

F.20_El script toma como referencia el movimiento de los hombros, estableciendo una línea perpendicular entre ellos permitiendo predecir hacia donde se dirigió la vista. Mediante una línea (perpendicular a la línea entre los hombros) en el origen de la fachada se calcula el ángulo entre ambas líneas, determinando cuanto debe de rotar de la fachada. Fuente: Elaboración propia.



F.18

F.19



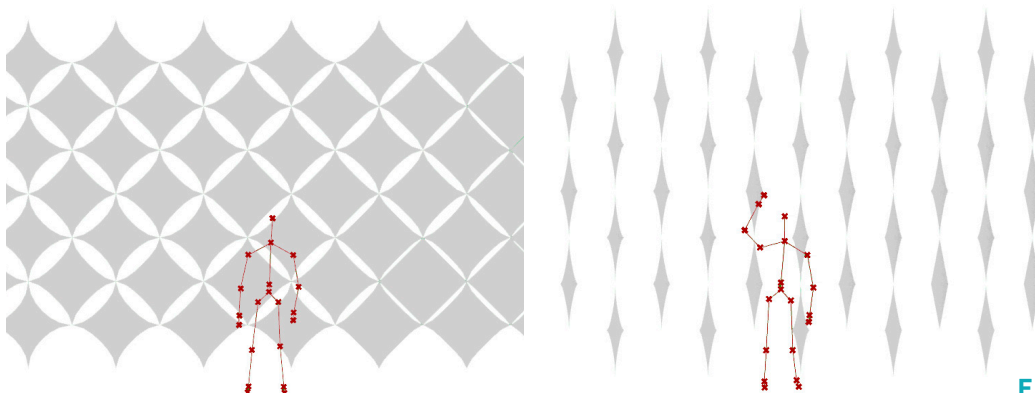
F.20

_Interacciones gestuales

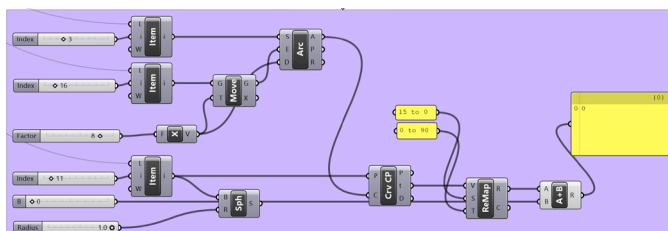
F.21_Cuarta interacción:

Mano hacia arriba

F.22_ El script genera un arco entre la cabeza y la cadera. Mediante un curve closet point, establece la posición más cercana de la mano dentro de la curva del arco con un punto que recorre dicha curva. El número obtenido por la posición en Y de dicho punto se re-mapea para que el valor oscile entre 0 y 90. Entonces al subir la mano a la altura de la cabeza la fachada se abre. Fuente: Elaboración propia.



F.21

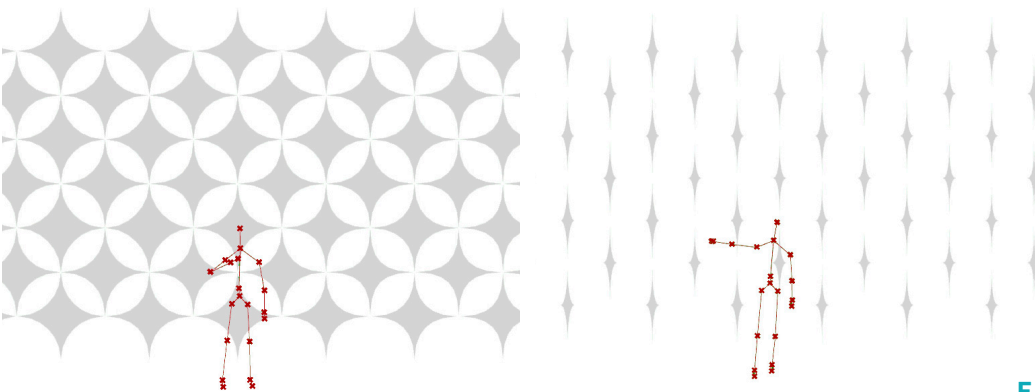


F.22

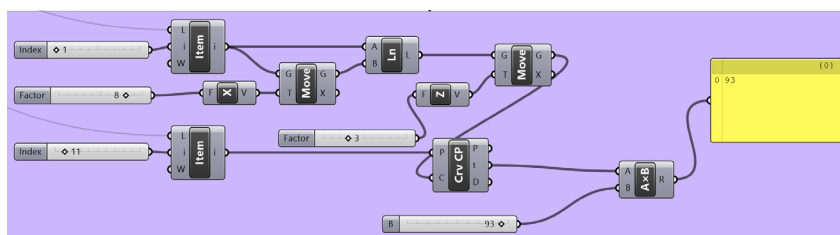
F.23_Quinta interacción:

Mano hacia la derecha para abrir

F.24_ El script genera una línea horizontal de 1m de longitud desde el centro del cuerpo hacia la derecha. Mediante un curve closet point, establece la posición más cercana de la mano dentro de la línea con un punto que recorre la curva. El número obtenido por la posición en X de dicho punto oscila entre el 0 y 1 se multiplica por 90. Por lo que al mover el brazo hacia la derecha la fachada se abre en 90°. Fuente: Elaboración propia.



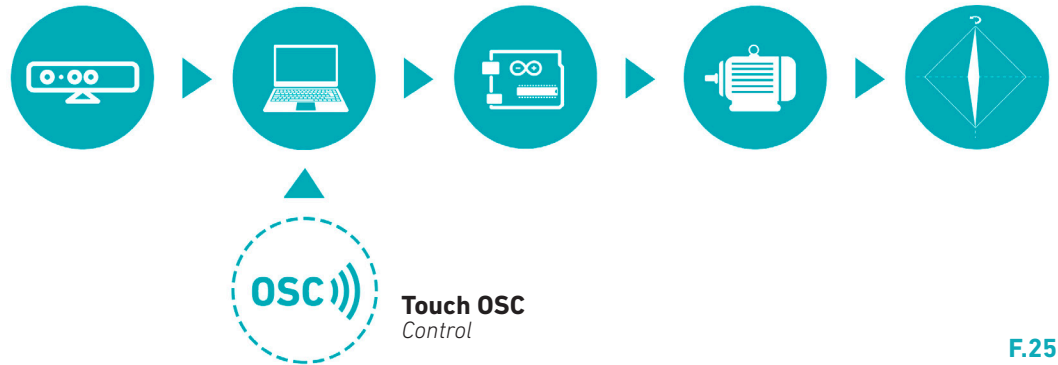
F.23



F.24

F.25 Integración del touch OSC al sistema interactivo. Fuente: Elaboración propia.

Integración de dispositivos móviles



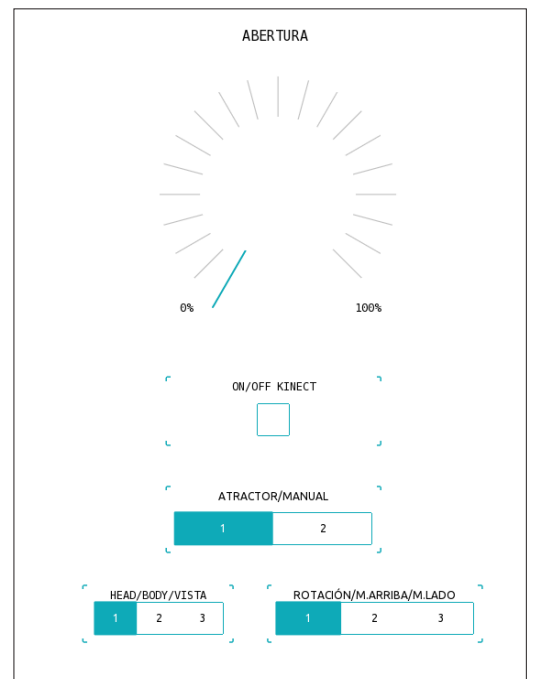
F.25

F.26 Script del OSC listener, separando las opciones de uso de la interfaz: Fuente: Elaboración propia.

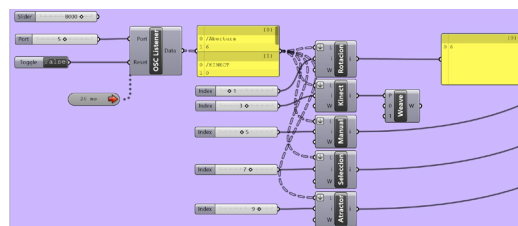
F.27 Script para seleccionar las interacciones. Fuente: Elaboración propia.

F.28 Interfaz diseñada en Touch OSC para controlar la parte interactiva de la fachada mediante dispositivos móviles

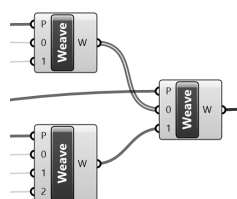
Experimentando con las posibilidades de firefly sé probo la opción de enviar mensajes OSC (Open Sound control) desde dispositivos móviles a grasshopper, con el fin de tener un control mayor sobre la fachada. OSC es un protocolo que establece conexiones inalámbricas entre programas (software) y dispositivos digitales. Si bien en cierto que su uso está orientado al mundo de la música, sobre todo DJ y producción, OSC es capaz de enviar de un dispositivo a otro mensaje personalizado, que a través de firefly puede ser de gran utilidad para controlar un sin fin de elementos físicos a mediante un Arduino^{F.26}. De esta manera con el software TouchOSC se diseñó una interfaz simple^{F.27} para poder controlar en primer lugar con cuál de las interacciones mencionadas anteriormente funcionará la fachada^{F.28}, pudiendo elegir o cambiarla en cualquier momento desde un dispositivo móvil. También se programó un botón de encendido y apagado de la kinect, además de un dimmer para controlar la abertura de la fachada de manera manual.



F.28



F.26



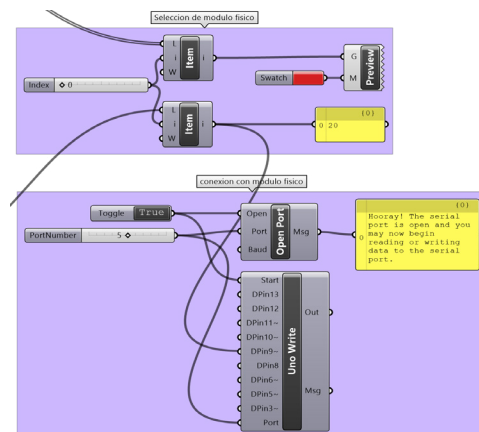
F.27

F.29 Script de selección de modulo digital, al cual imitara el prototipo fisico mediante la conexión Fire-fly-Arduino. Fuente: Elaboración propia.

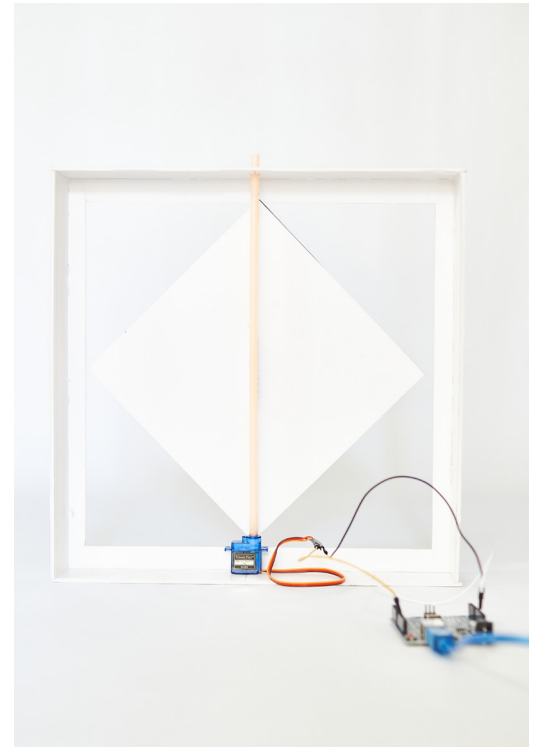
4.2.2_Modelo fisico de prueba

Para finalizar la experimentación de la parte interactiva se construyo un modelo físico de prueba^{F.30}. Con el objetivo de comprobar que la conexión con Arduino sea exitosa, y que esta sea capas de reproducir los movimientos de un módulo seleccionado en el modelo digital^{F.29}.

F.30 Modelo fisico de carton pluma hecho par las pruebas de conexión y movimiento. Fuente: Elaboración propia.



F.29



F.30

4.3_Compportamiento Responsivo

El estudio del comportamiento responsivo de esta investigación es la que está pensada para integrar los el soft robotic a este sistema de fachada responsiva-interactiva. Dada la naturaleza pasiva del movimiento que se planteó en el diseño del módulo hace sentido el uso de materiales blandos para su construcción.

Como actuador se decidió hacer uso de una alineación con memoria de forma (SMA), en este caso, el nitinol. El nitinol es una aleación de níquel y titanio en proporciones casi iguales (45% y 55% respectivamente). El nitinol se presenta en dos fases estables, una a alta temperatura, austenita, y otra a baja temperatura, martensita. Cuando el nitinol se encuentra en fase martensita es fácilmente deformable, pero al aplicarle una fuente de calor o energía eléctrica este entra en una etapa de transición hasta llegar a la fase austenita en donde el material vuelve a su forma original con propiedades superelásticas. Luego de enfriarse el nitinol vuelve a la fase martensita sin deformar.

La experimentación responsiva del trabajo consistió en dos partes. La primera fue lograr reprogramar un nitinol (T° 40°C) de una forma lineal a una forma de resorte^{F.31} y la segunda fue realizar el ejercicio de fuerza-contra fuerza del nitinol con una liga o elástico^{F.32}.

La idea del segundo ejercicio es que el nitinol cuando esté en fase martensita (fase fácilmente deformable) tome una forma estirada por la contracción de un elástico, sin embargo, cuando se aplique el calor de transición el nitinol vuelva a su forma original (resorte). Esto aplicado a la fachada tiene la lógica de que cuando el nitinol reciba el color suficiente por parte del sol, este se contraerá cerrando la fachada. Cuando el nitinol deje de recibir el calor o la radiación necesaria para su transición de la etapa martensita a la austenita por parte del sol, este se volverá a estirar por la tensión del elástico, volviendo a abrir la fachada^{F.33}.

F.31 Programación del nitinol. Se utilizo un tubo de cobre para enrollar el nitinol, posterior a eso se le aplico una temperatura superior a 500°C por unos segundos con un soplete. luego de aplicar calor se enfria en agua, quedando el nitinol con la nueva forma de resorte. Fuente: Elaboración propia.



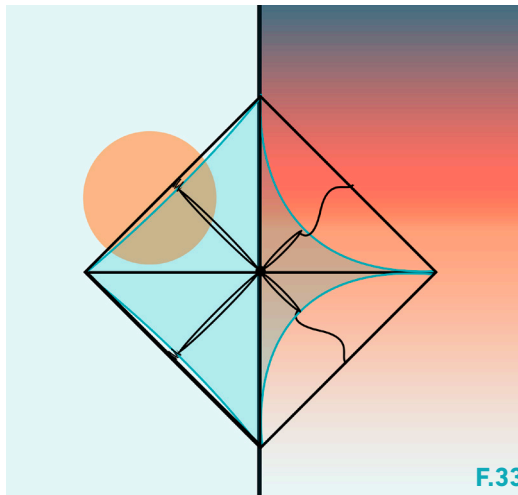
F.31

F.32 Prueba de tensión y contracción del nitinol y la liga, luego de aplicar calor con un secador de pelo. Fuente: Elaboración propia.



F.32

F.33 Ilustración de funcionamiento nitinol. Fuente: Elaboración propia.



F.33

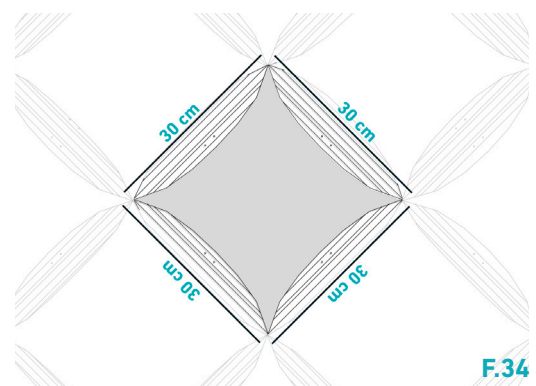
Nitinol en su forma programada (resorte) expuesto al calor. Elastico en tensión

Nitinol en fase martensita deformado por el elastico cuando no hay presencia de calor

F.34 Modulo de 30x30 cm. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Prototipo

El prototipo final consiste en un módulo de 30x30 cm de la retícula de la fachada^{F.34}. Este consta de **tres partes** importantes. En **primer lugar, el marco exterior** que tiene el rol de soportar los demás elementos. En **segundo lugar, el marco interior** que es donde ocurren ambos movimiento (responsivo-interactivo) además de contener el soft robotic. **Por último, las barras de soporte en ambos extremos del marco exterior**^{F.35}. En las barras es donde se encuentra el mecanismo de giro (servomotor) que se encarga de la parte interactiva del proyecto. La mayoría de las piezas, como lo son ambos marcos, los soportes y los engranajes fueron diseñadas mediante Rhinoceros para luego ser cortada atraves de láser CNC en madera MDF de 5 mm. El corte en láser, permitió cortes limpios y precisos de los elementos antes descritos.



F.34

El nitinol usado para este trabajo tiene una T° de transición de aprox. 40°C. En funcionamiento en conjunto al elástico, en las pruebas hechas al someter al calor al nitinol con un secador de pelo, este fue capaz de contraerse entre 4 y 5 cm, logrando cerrar casi por completo la fachada^{F.36}. También sé probo el sistema responsivo en exposición al calor del sol. Con una temperatura de 28°C el nitinol fue capaz de contraerse 1.5 cm como máxi-

F.35_Despiece isométrico de las partes del modulo prototipo. Fuente: Elaboración propia.

F.36_Cerramiento de la fachada a través del nitinol. Fuente: Elaboración propia.

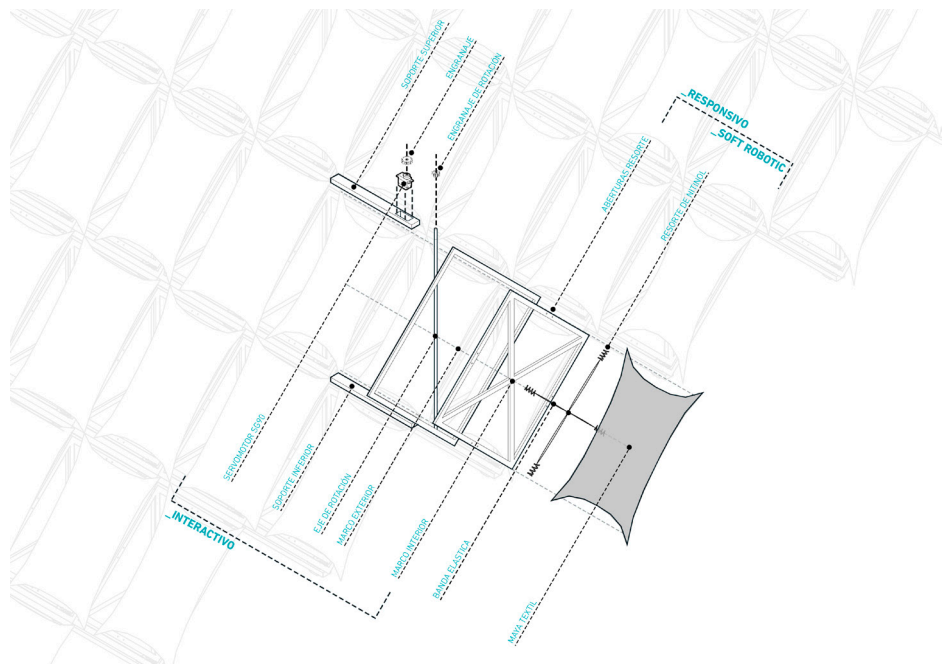
mo, en los primeros 5 minutos desde la exposición, manteniendo la longitud luego de eso. Este resultado es muy alentador, teniendo en consideración la alta temperatura de transición del nitinol utilizado, por lo que si en un caso hipotético se decidiera hacer la fachada para algún edificio, un nitinol con T° de transición de 20 a 35 ° c bastaría para que la fachada funcione de buena manera.

Una variable importante en la apertura de la fachada a considerar es el elástico y sus propiedades. En el caso del elástico usado este tiene un diámetro de 6 cm, que con la tensión del nitinol, logra estirarse hasta 6,5 cm en reposo (sin calor de por medio), activando el nitinol el elástico se estira hasta llegar entre los 11 y 11,5 cm. Se probaron otro tipo de elásticos, obteniendo menores longitudes de estiramiento. Esto se daba a que los elásticos eran más duros, o no tenían tanta capacidad elástica, por lo tanto, el nitinol requería altas temperaturas para con-

traerse, de otra forma no poseía la fuerza suficiente para estirar el elástico.

El soft robotic del sistema responsivo lo completa una piel, que consiste en una maya de material blando, en este caso una tela elástica que permite deformarse, adaptándose a los movimientos del nitinol. A la maya fue necesario aplicarle un doble pliegue en los bordes con el objetivo de que la piel pudiera cerrarse casi por completo de una forma más natural, además, esto permite también un fácil desmontaje de la misma.

El prototipo **F.37** funciona de tal forma que al establecer la conexión entre Arduino, la kinect y grasshopper, este comienza a responder a las interacciones programadas, pudiendo escoger cuál interacción se desea que esté activa. A la misma vez mediante el soft robotic es posible modificar la apertura de la piel con una fuente de calor a partir de 35 a 40°c aproximadamente.

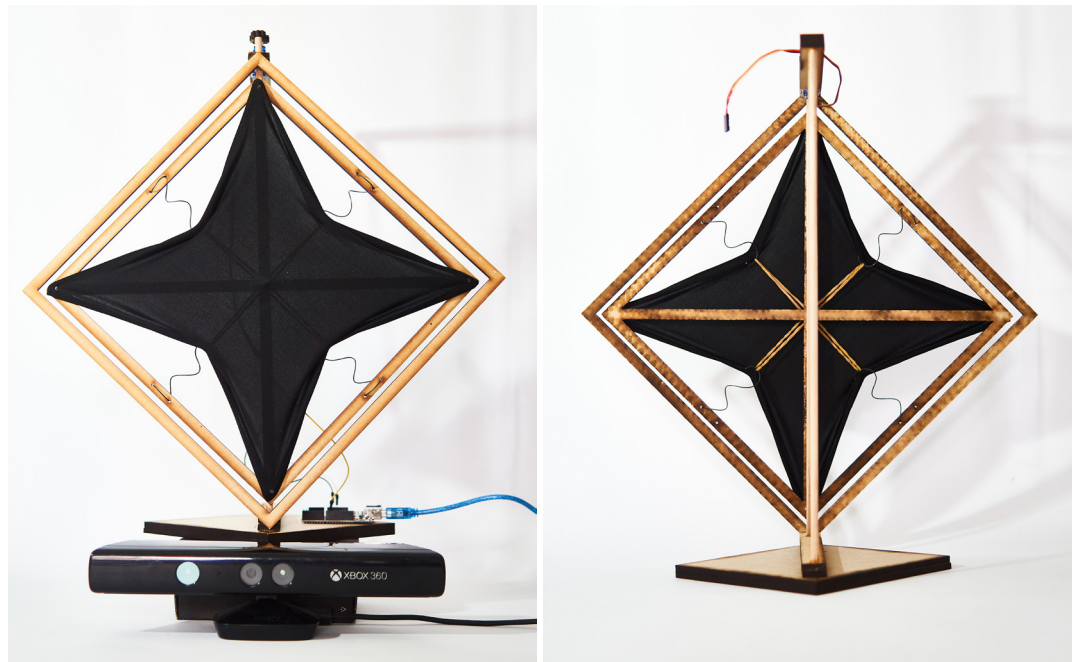


F.35



F.36

F.37_Prototipo del sistema responsivo-interactivo (Modulo adaptativo, kinect, arduino). Fuente: Elaboración propia



F.37

5_RESULTADOS

1_El prototipo tiene el comportamiento esperado, debido a que logra tener una respuesta pasiva cuando está expuesto al calor y una activa con las interacciones, todo en un mismo sistema integrado.

2_Las expresiones o gestos de los que están compuestas la parte interactiva del trabajo tienen un gran potencial de personalización. Existe la posibilidad de que así como se programaron ciertas interacciones propias (por ser el autor), también el sistema pueda ser personalizable desde el punto de vista de quien lo utiliza, entendiendo que cada persona puede tener una forma diferente de hacer los gestos para determinadas acciones. De esta manera el sistema podría actuar según el usuario y no solo de un modo preestablecido.

3_La programación del nitinol empleado fue relativamente sencilla. Fue de este

modo debido a que el nitinol del prototipo venía previamente entrenado y con una T° de transición específica (40 °C). También se experimentó con un nitinol no entrenado que no tenía T° de transición, debiendo asignarla uno mismo, lo que es muy complicado si no se tienen elementos específicos para medir los ciclos de calentado y la temperatura, además de hornos que alcanzan altas temperaturas.

4_Fue posible hacer este sistema integrado a través de la hibridación de distintos elementos previamente diseñados que no necesariamente están hechos para lo que se utilizaron en esta investigación. La manera de integrarlas fue mediante el uso grasshopper y sus plying, que en complementación de soft robotic, permitió crear un sistema robótico híbrido capaz de adoptar ambos comportamientos adaptativos (responsivo-interactivo)^{T.2}.

Tabla 2_Caracterización de la fachada responsiva-interactiva

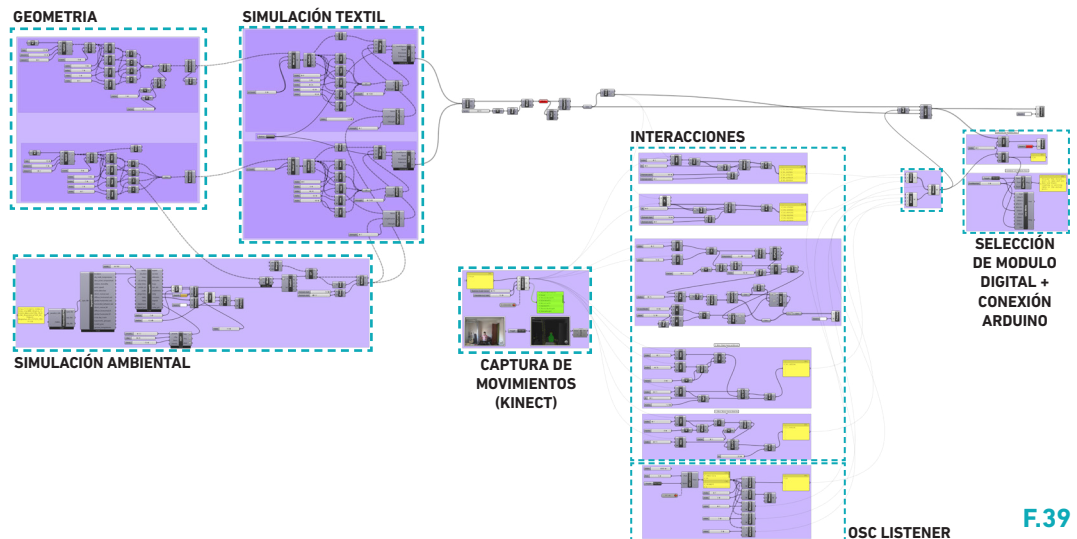
Tipo de sistema adaptativo	Materialidad	Tipo de accionamiento	Activación con/sin uso e. electrica	Tipo de Interacción usuario	Variable a la que responde (Medio externo-interno)
Fachada cinetica	Hibrido	Electrico/Calor	Hbrido	Participa	Medio externo Interno (usuario)

F.38_Imagen objetivo de la fachada. Fuente: Elaboración propia.



F.38

F.39_Script de la fachada responsiva. Fuente: Elaboración propia.



F.39

6_CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Una arquitectura que sea capaz adaptarse a los cambios ambientales pero que a la vez tenga en cuenta la presencia humana, supone una arquitectura que no es estática y que evoluciona en ambos sentidos, lo que puede tener un sin fin de beneficios. Por un lado, si lo vemos desde un punto de vista responsivo, el poder adaptarse a cambios en el ambiente posibilita la protección de elementos externo, pudiendo aumentar la esperanza de vida de un edificio y también disminuir el consumo energético, entre otras cosas. **Desde el punto de vista interactivo, es interesante reflexionar en una arquitectura expresiva, que sea capaz de reconocer que actividades se están dando dentro de un espacio, y adapte sus condiciones**

morfológicas para mejorar la realización o incluso posibilitar dichas actividades.

Al iniciar esta investigación, la teoría indicaba que los soft robotic podían tener un potencial gigante en las interacciones, por sus capacidades blandas y su compatibilidad con los humanos. **Es por esto que la aplicación de soft robotic a las interacciones en la arquitectura es una oportunidad de investigación relevante, sobre todo si aquellas interacciones no requieren de un suministro constante de energía para funcionar.** Un ejemplo de esto, es la posibilidad de utilizar nitinol con una baja T° de transición (15° o 20° C) para generar cambios

en un edificio únicamente con el calor corporal, sin la necesidad de energía eléctrica, software, ni mecanismos complejos, solamente la inteligencia del material.

Un camino para avanzar en el estudio de arquitectura adaptativa, es mediante la hibridación. La hibridación permite explorar elementos existentes que están aparentemente separados y juntarlos para obtener un resultado nuevo, distinto al fin para él fueron hechos. En este caso en particular, permitió integrar dos elementos que por lo visto no suelen relacionarse, responsividad e interacción.

Si bien el sistema es una hibridación de varios elementos (grasshopper, arduino y kinect), estos son open source. Esto da la posibilidad de que en caso de querer desarrollar una fachada completa, existe la posibilidad de adaptar la programación a un lenguaje que sea compatible a ordenadores de placa pequeña, como Raspberry pi. Esto permitiría dejar de emplear una computadora convencional o laptops para controlar la fachada lo que reduciría el tamaño del sistema y la complejidad y la haría aún más accesible en términos económicos.

En términos personales la realización de esta investigación significó un enriquecimiento muy grande en muchos aspectos. Uno de los que más puedo destacar es haber desarrollado mejor el pensamiento lógico a medida que desarrollaba la parte experimental. El uso de la programación contribuyó en gran parte a eso, debido a que constantemente debía enfrentarme a como resolver problemas en el modelo digital relacionados con la forma, funcionamiento, simulaciones y la creación de los gestos en las interacciones.

Llevar a cabo este trabajo requirió integrar y aprender múltiples materias. Como por ejemplo la antes mencionada programación, el diseño y prototipado, digitalización para cortar en láser, trabajo y programación del material (nitinol), Arduino, entre otras cosas. Esto sin contar con el

desarrollo de las habilidades investigativas y de escritura, **lo que indudablemente significó un progreso en destrezas que antes de esta investigación eran muy escasas o no existían.**

Por otra parte, a medida que iba desarrollando el trabajo, sobre todo la segunda parte (diseño del experimento y modelo digital), me fui dando cuenta que el desarrollo de un diseño y en general, la creatividad muchas veces no son lineales. Si bien tenía pasos establecidos para desarrollar el trabajo, muchas veces debía volver una y otra vez o probar desde diferentes ángulos para llegar a una buena idea. Esto me llevó a empezar por las simulaciones para darme cuenta de las posibilidades y limitaciones que podía tener tanto las herramientas computacionales como los potenciales materiales a usar. Esto finalmente derivó en un diseño de fachada con sus respectivos movimientos y respuestas.

7_BIBLIOGRAFIA

1. Abdelmohsen, S., Massoud, P., & Elshafei, A. (2016). Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive. Complexity & Simplicity - Proceedings of the 34th ECAADe Conference, 1, 529–536.
2. Abramovic, V. (2017). Roamniture: Multi-stable Soft Robotic Structures. Ecaade 2017: Sharing of Computable Knowledge!(Shock!), 2, 87–96.
3. Cardoso, D., Michaud, D., & Sass, L. (2007). Soft Façade : Steps into the Definition of a Responsive ETFE Façade for High-rise Buildings Work in Progress. ECAADe 25, 567–574.
4. de Queiroz Nome, N., Carvalho, J. M., Verzola Vaz, C. E., & Nome, C. A. (2018). Pared cinética: Una fachada humana y ambientalmente responsiva. Arquitecturas Del Sur, 36(54), 58–69. <https://doi.org/10.22320/07196466.2018.36.054.05>
5. Decker, M. (2015). Soft Robotics and Emergent Materials in Architecture. ECAADe 2015: Real Time - Proceedings of the 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2, 409–416. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2015_178

6. Dickey, R. (2017). Soft Systems: Rethinking Indeterminacy in Architecture as Opportunity Driven Research. *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Bhatia 2012*, 811–821.
7. Franco, J. T. (2013, January 15). Las Torres Al Bahar y su fachada sensible, por Aedas Architects. Recuperado 2 de junio, 2021, de Plataformaarquitectura.cl pagina web: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-226760/las-torres-al-bahar-y-sus-fachadas-sensibles-por-aedas-architects>
8. Khoo, C. K., Burry, J., & Burry, M. (2011). Soft responsive kinetic system: An elastic transformable architectural skin for climatic and visual control. *Integration Through Computation - Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2011*, 334–341.
9. Kieffer, L., Danish, C. R., & Nicholas, P. (2018). Pneumatically Actuated Material. *ACADIA 2018: Re/Calibration: On Imprecision and Infidelity - Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 294–301. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia18_294
10. Leva. (n.d.). Recuperado 2 de junio, 2021, de Leva.io pagina web: <https://www.leva.io/projects/kinetic-wall>
11. Majidi, Carmel. (2014). Soft Robotics: A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future. *Soft Robotics*. 1. 5-11. 10.1089/soro.2013.0001.
12. Medina H., J., & Vélez N., P. (2015). "Soft Robotic": Una nueva generación de robots. *Maskana*, 0(0), 109–118.
13. Omar, A. faleh. (2017). *Responsive Architecture a Place Making Design Strategy*.
14. Parlac, V. (n.d.). *Soft Kinetics Integrating: Integrating Soft Robotics into Architectural Assemblies*.
15. Rezaeicherati, A., & Mahdavejad, M. (2016). *SoRo Responsive Wall*. 2, 623–630.
16. Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. In *Nature* (Vol. 521, Issue 7553). <https://doi.org/10.1038/nature14543>
17. SoRo - Lightweight Passive Shading System – IAAC Blog. (n.d.). recuperado 2 de junio, 2021, de iaacblog.com pagina web: <http://www.iaacblog.com/programs/soro-lightweight-passive-shading-system/>
18. Sparrman, B., du Pasquier, C., Thomsen, C., Darbari, S., Rustom, R., Laucks, J., Shea, K., & Tibbits, S. (2021). Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics. *Additive Manufacturing*, 40(September 2020), 101860. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101860>
19. Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D., & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation. *ACADIA 2014 - Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 2014–October, 539–548.
20. WATER DRIVEN-BREATHING SKIN – IAAC blog. (n.d.). Recuperado 2 de junio, 2021, de iaacblog.com pagina web: <http://www.iaacblog.com/programs/waterdriven-breathingskin/>
21. Whitesides, G. M. (2018). *Soft Robotics. Angewandte Chemie - International Edition*, 57(16), 4258–4273. <https://doi.org/10.1002/anie.201800907>