



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA-TECNOLOGÍA

ENVOLVENTE CINÉTICA:
HACIA UNA SUPERFICIE ADAPTABLE AL MEDIO AMBIENTE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
GUSTAVO ISAAC MOYA GONZÁLEZ

TUTOR
Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz
FACULTAD DE ARQUITECTURA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Mtro. en Arq. Alejandro Esteban Marambio Castillo
FACULTAD DE ARQUITECTURA
Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez
FACULTAD DE ARQUITECTURA
Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos
FACULTAD DE ARQUITECTURA
Mtro. en Arq. Arturo Valeriano Flores
FACULTAD DE ARQUITECTURA

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2017



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.

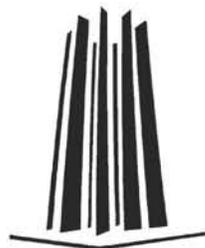


ENVOLVENTE CINÉTICA

HACIA UNA SUPERFICIE ADAPTABLE AL
MEDIO AMBIENTE

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
GUSTAVO ISAAC MOYA GONZÁLEZ



FES Aragón



Prefacio

La presente investigación tiene como influencia la exploración de modelos de envolventes arquitectónicas, vinculadas con modelos de interacción entre contextos naturales y artificiales. Considerando la dependencia del tiempo y el cambio, en relación a la forma y función de la envolvente arquitectónica. Asimismo, la exploración del potencial de los procesos digitales transferidos a acciones mediante sistemas tangibles con capacidades de cambiar, modificar o transformar variables entre dos o más contextos. Es conveniente destacar la relevancia de la envolvente arquitectónica, comprendido como el medio preponderante de intercambio entre el interior del edificio y el medio ambiente. Aunado a la posibilidad de establecer diversas estrategias de intercambio selectivo a modo de un filtro selectivo de variables entre dos o más entornos. De igual modo, el potencial de aplicación de cada componente que constituye un modelo cinético transferido a otras modalidades del diseño arquitectónico.

Agradecimientos

Le agradezco a mi madre y padre por su apoyo absoluto.

Asimismo, al Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz por su tutoría y a todos los profesores por los conocimientos compartidos.

De igual modo a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad para realizar la presente investigación.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado.



Índice

	Introducción	1
1	Planteamiento de la investigación	3
1.1	Objetivo general	5
1.1.1	Objetivos específicos	5
1.2	Hipótesis de investigación	6
2	Envolvente cinética	9
2.1	Antecedentes	9
2.2	Concepto de envolvente cinética	11
2.3	Interacciones de la envolvente cinética	12
2.4	Influencias de la biomimética	18
3	La envolvente cinética en conjunción con el medio ambiente	25
3.1	Diversidad de estrategias en conjunción con la variabilidad del medio ambiente	26
3.1.1	Radiación solar	27
3.1.2	Ventilación natural	30
3.1.3	Estrategias de enfriamiento y calentamiento	33

3.2	Intercambio selectivo	39
3.2.1	Recurso potencial externo	41
3.2.2	Estrategias preventivas	42
3.2.3	Estrategias en conjuntos	42
4	Implementación de materiales emergentes	47
4.1	Aerogel	48
4.2	Polímeros con memoria de forma y electro-activos	52
5	Prototipo de envoltente cinética	61
5.1	Desarrollo de ideas iniciales	62
5.2	Representación del prototipo seleccionado	69
5.3	Características de movilidad	71
5.4	Autonomía energética y operativa	75
5.5	Desarrollo del espacio experimental	79
5.5.1	Diseño del módulo experimental	85
5.5.2	Materiales	88
5.5.3	Sensores y actuadores	89
5.5.4	Hardware	90
5.5.5	Software	92
5.6	Análisis de las simulaciones digitales	94
5.7	Análisis de los resultados del prototipo en físico	115
5.8	Discusión de resultados	118
	Conclusiones y prospectivas	122
	Referencias	127
	Glosario	134
	Anexos	136

Tablas

Tabla 1	14
Comparación de sistemas de protección solar	
Tabla 2	17
Ejemplos de envolventes cinéticas	
Tabla 3	29
Espectro electromagnético	
Tabla 4	34
Confort térmico	

Figuras

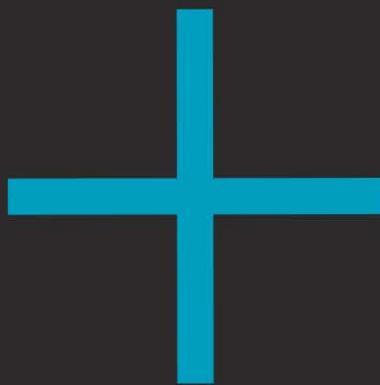
Figura 1	36
Coeficiente de sombreado	
Figura 2	37
Coeficiente de ganancia de calor solar	
Figura 3	38
Transmitancia visible	
Figura 4	40
Filtro selectivo de la radiación solar	
Figura 5	40
Filtro selectivo de la ventilación natural	
Figura 6	50
Aerogel	
Figura 7	51
Comparación de temperatura de los objetos de aerogel	
Figura 8	55
Materiales emergentes	
Figura 9	56
Impresión 3D	
Figura 10	63
Prototipo de seguidor solar	
Figura 11	64
Geometría solar para la ubicación de la Ciudad de México	
Figura 12	65
Maqueta conceptual	
Figura 13	66
Configuración de la geometría-contexto	
Figura 14	67
Prototipo: patrones de aberturas y capas	

Figura 15	68
Prototipo de aberturas y capas	
Figura 16	70
Prototipo de envolvente cinética	
Figura 17	72
Capacidades de movimiento de la envolvente cinética	
Figura 18	73
Principales fases de movimientos de la envolvente cinética	
Figura 19	73
Diversidad de proporciones	
Figura 20	74
Patrones generados mediante la envolvente cinética	
Figura 21	76
Autonomía energética	
Figura 22	78
Captura de pantalla de la disposición realizada en la plataforma de Thinger.io	
Figura 23	80
Proyección equidistante del Sol con referencias de temperatura del 21 de diciembre al 21 de junio del 2015, en la Ciudad de México	
Figura 24	81
Proyección equidistante del Sol con referencias de temperatura del 21 de junio al 21 de diciembre del 2015, en la Ciudad de México	
Figura 25	82
Rangos de temperatura en la Ciudad de México	
Figura 26	84
Esquema de la estructura del funcionamiento general del prototipo de envolvente cinética	
Figura 27	86
Prototipo de envolvente cinética	
Figura 28	87
Módulo experimental	

Figura 29	91
Representación de la interconexión del microcontrolador	
Figura 30	93
Configuración de la envolvente en Arduino- IDE	
Figura 31	95
Resultados del desempeño térmico de la envolvente cinética en relación al ángulo de abertura (<i>Glazing system</i>)	
Figura 32	96
Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación norte	
Figura 33	97
Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación sur	
Figura 34	98
Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación este	
Figura 35	99
Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación oeste	
Figura 36	100
Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación norte	
Figura 37	101
Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación sur	
Figura 38	102
Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación este	
Figura 39	103
Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación oeste	
Figura 40	104
Promedio de insolación acumulativa de la superficie interna con el despliegue de protección del prototipo en distintos ángulos respecto a al eje vertical, orientación sur	

Figura 41	105
Promedio acumulativo de insolación de las superficies, sin el uso del prototipo, en distintas orientaciones.	
Figura 42	106
Daylight Factor del movimiento de las franjas de aerogel	
Figura 43	107
Daylight Factor del movimiento del marco	
Figura 44	108
Simulaciones de iluminancia total en relación al ángulo de abertura de las franjas de la envolvente cinética	
Figura 45	109
Simulaciones de iluminancia total en relación al ángulo de abertura del marco de la envolvente cinética	
Figura 46	110
Iluminancia total del movimiento de las franjas en distintos ángulos de abertura	
Figura 47	110
Iluminancia total del movimiento del marco en distintos ángulos de abertura	
Figura 48	111
Iluminancia total del movimiento de las franjas en distintos ángulos para el solsticio de diciembre	
Figura 49	112
Velocidad de 3.57 m/s en el eje X	
Figura 50	112
Velocidad de 3.57 m/s en el eje Y	
Figura 51	113
Velocidad de 3.57 m/s en el eje X con un ángulo de abertura de 90°	
Figura 52	113
Velocidad de 3.57 m/s en el eje Y con un ángulo de abertura de 45°	
Figura 53	114
Velocidad de 3.57 m/s en el eje X con un ángulo de abertura de 45°	

Figura 54	116
Ángulo de abertura de la envolvente en relación a las mediciones de iluminación natural al interior y al exterior del módulo experimental	
Figura 55	117
Relación del ángulo de abertura con una fuente de iluminación artificial directa	
Figura 56	120
Ángulo de abertura de 45° en relación con las simulaciones	



Introducción

La envolvente cinética es una delimitación espacial dinámica que interviene en el intercambio entre variables del contexto y las condicionantes del interior del edificio. Debido a la factibilidad de generar cambios en secuencias de tiempo relativamente cortos, en menos de un minuto, es factible aprovechar los recursos externos de la temperie para el uso como recurso activo en el interior del edificio. De modo tal que la envolvente cinética es el funcionamiento sinérgico de distintos componentes que tienen como convergencia el funcionamiento cohesivo de un sistema. Destacando la capacidad de movimiento de la envolvente para trabajar en conjunción con el medio ambiente. Asimismo, la posibilidad de implementar el uso de diferentes modalidades de movimientos, materiales, sensores y procesadores de datos.

Al igual que la posibilidad de desarrollar la autonomía operativa y energética de la envolvente cinética. El desarrollo de la investigación tiene como influencia la complejidad y eficiencia de los procedimientos de la naturaleza, analizado de manera abstracta a modo de un gran laboratorio que tiene modelos por ser descubiertos por la imaginación y nuestra capacidad de observación. Considerando el potencial creativo y los recursos tecnológicos emergentes, aunado a la posibilidad de integrar el desarrollo de la envolvente a líneas filogenéticas de desarrollo, utilizando las determinantes de cada región. Por tal motivo, se tiene el interés en desarrollar una envolvente con un estrecho vínculo con las condiciones únicas del lugar y sus necesidades, semejante a los procedimientos de la naturaleza.



Planteamiento de la investigación



La obtención de energía y sus procesos para obtenerla, ha sido motivo de transformaciones sociales, políticas, económicas y medioambientales, a lo largo de la historia. Asimismo, la eficiencia en la obtención y manipulación de la energía, así como la continua optimización de los objetos y sistemas de consumo: son en conjunto un indicador del potencial y creatividad de cada civilización para responder ante ciertas necesidades en relación con el contexto histórico del desarrollo tecnológico.

“La energía es una de las entradas cruciales para el desarrollo socio-económico. El índice al cual la energía es consumida por una nación frecuentemente refleja el nivel de prosperidad que puede lograr” (Mathew, 2006, p.1).

Sin embargo, el uso irracional del desarrollo tecnológico y a su vez el vínculo en diversos niveles con las transiciones socio-económicas, tienen efectos contraproducentes en el medio ambiente y en el proceso de un sentido de progreso hacia un estado o fase ideal. Tal y como sucedió durante la revolución industrial, siglo XIX. La revolución industrial impulsada por los avances en distintos sectores fue un periodo revolucionario en términos tecnológicos. Sin embargo, en contraste a tal magnitud e intensidad de desarrollo y producción, aunado a las condiciones laborales insalubres e inseguras, implicó una extrapolación del significado de producción masiva. Es decir, por un lado el aumento del Producto Interno Bruto (PIB) tuvo un aumento trascendental, sin embargo, en contraparte las fuerzas impulsoras de tal desarrollo crearon la inoperatividad para las futuras generaciones.

Asimismo, la crisis energética de la década de 1970 vinculado a modelos de consumo irracionales, han desempeñado momentos de conciencia colectiva de la importancia de seguir mejorando los modelos de consumo. Para ello, implica restablecer parámetros políticos, económicos, sociales y medio ambientales. Los modelos provistos por la arquitectura son una fuente jerárquica en las diversas transiciones hacia nuevos modelos. Las transiciones en algunas ocasiones recurren en su mayor parte a una síntesis de un estado del arte, sin embargo, en otras ocasiones son manifestaciones puras de un futuro ideal. Ambos modelos, mencionados anteriormente, son de suma importancia para el desarrollo tecnológico.

Consiguientemente, el desarrollo tecnológico debe estar en estrecho vínculo desde su origen conceptual con el contexto. La relación con el contexto implica vincular la arquitectura a nivel macro (función como sistema), nivel medio (conjunto de componentes derivados el sistema) y a nivel micro (los elementos que forman las partes). Asociado a la importancia de utilizar los recursos tecnológicos con un enfoque de construcción de vínculos con el contexto, adjudicando el valor de interacción con el usuario (Kameas, Goumopoulos, Hagraas, Callaghan, Heinroth y Weber, 2009, p. 46).

En la actualidad, los distintos avances tecnológicos posibilitan la exploración de futuros modelos. Los métodos y herramientas son cada vez más flexibles, respecto a la posibilidad de integración y desarrollo. Un ejemplo es la fabricación digital, mediante el cual es posible colaborar a escala global y realizar el objeto de estudio con recursos locales. Asimismo, el enfoque de un diseño avanzado con una dimensión "*futurable*" (Celi, 2015, p.23). Eventualmente se provee de la interconexión de la arquitectura con otras disciplinas, enriqueciendo la reciprocidad y retroalimentación de futuros proyectos.

La presente investigación busca tomar vínculos del impulso tecnológico con aplicaciones arquitectónicas. Igualmente, se busca explorar nuevos medios y modelos, factibles de expandir el espectro de funciones con el contexto. Mediante el desarrollo de un prototipo de envolvente cinética, se explora: el aprovechamiento de variables medio ambientales, el uso de sistemas automatizados, la autonomía energética, el flujo de datos y el uso de recursos tecnológicos recientes. A su vez, se explora el gran potencial de los futuros hábitats artificiales para los seres humanos, incorporando vínculos a los cambios con la finalidad de proporcionar modelos que trabajen en conjunción con la variabilidad del contexto. La utilidad de las características cinéticas, logradas mediante la envolvente arquitectónica, proveen de una mayor flexibilidad a los espacios arquitectónicos: posibilitando la adaptación e interacción con un vínculo activo con el medio ambiente y en constante ciclo de retroalimentación.

1.1 Objetivo general

Mediante el desarrollo de un prototipo de envolvente cinética se regulará la radiación solar, iluminación natural y ventilación natural con la finalidad de proveer una permisibilidad selectiva de variables introducidas al espacio arquitectónico, optimizando la regularidad de las condicionantes de confort al interior del edificio de referencia.

1.1.1 Objetivos específicos

- > Regular el Coeficiente de Sombreado, *Shading Coefficient (SC)*, en un rango menor o igual a 0.2 en la función de protección (cerrado) y un rango mayor o igual a 0.8 en la función de permisibilidad (abierto).
- > Regular el Coeficiente de Ganancia de Calor Solar, *Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)*, en un rango menor o igual a 0.2 en la función de protección (cerrado) y un rango mayor o igual a 0.7 en la función de permisibilidad (abierto).
- > Regular la Transmitancia Visible, *Visible Transmittance (VT)*, en un rango menor o igual a 0.2 en la función de protección (cerrado) y un rango mayor o igual a 0.8 en la función de permisibilidad (abierto).
- > Permitir el flujo de la ventilación natural y la posibilidad de re-direccionar los flujos del viento hacia el interior del edificio cuando se requiera del uso de la ventilación natural.

- > Automatizar el proceso de permisibilidad selectiva del prototipo de envolvente cinética mediante sensores, el procesamiento de los datos y actuadores que brinden la movilidad a la envolvente.
- > Explorar nuevos modelos de envolventes cinéticas, desarrolladas desde su origen conceptual bajo la influencia de ser un sistema flexible susceptible a los cambios, con la finalidad de favorecer la regularidad de las condiciones de temperatura, iluminación natural y ventilación natural al interior del edificio.

1.2

Hipótesis de investigación

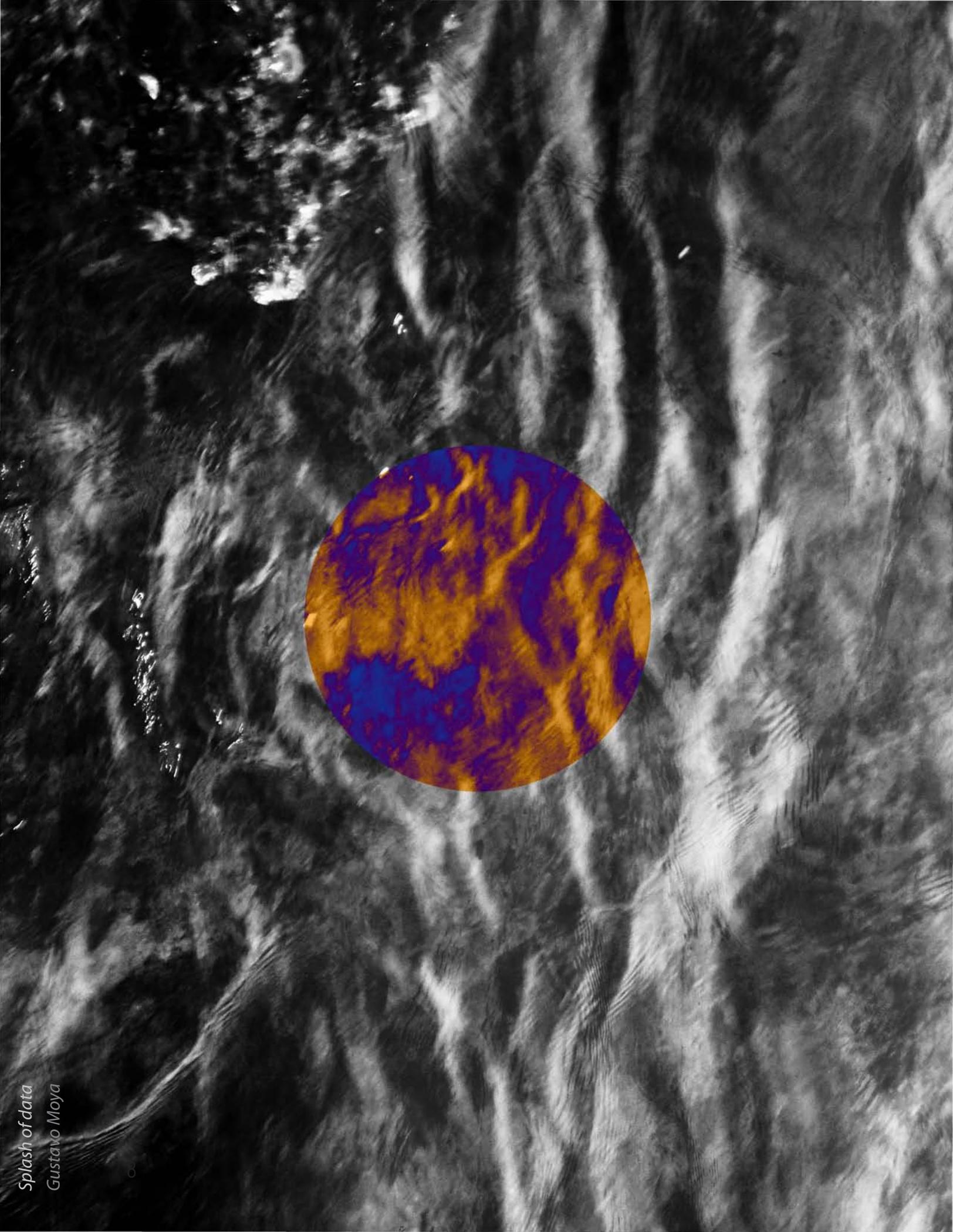
Mediante el desarrollo de un prototipo de envolvente cinética constituido por: un sistema automatizado de movilidad, sensores de monitoreo, autonomía energética, el uso de aerogel como aislamiento y el uso de algoritmos; se optimizará la regularidad de las condiciones de temperatura, iluminación natural y ventilación natural al interior del edificio de referencia.

Referencias

Celi, M. (2015). Preliminary Studies on *AdvanceDesig*. En Celi, M. (Ed.), *Advanced Design Cultures: long-term perspective and continuous innovation* (pp. 19-36). Londres: Springer.

Kameas, A. D., Goumopoulos, C., Hagraas, H., Callaghan, V., Heinroth, T., y Weber, M. (2009). An Architecture that Supports Task-Centered Adaptation in Intelligent Environments. En Minker, W., Weber, M., Hagraas, H., Callagan, V., y Kameas, A. D. (Eds.), *Advanced Intelligent Environments* (pp. 41-66). Nueva York: Springer.

Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Heidelberg: Springer.



Splash of data
Gustavo Moya

Envolvente cinética

2.1

Antecedentes

La envolvente de los edificios ha sido objeto de desarrollo debido a la jerarquía de vínculos con el contexto y el preponderante avance tecnológico en las últimas décadas. Las funciones que puede desempeñar la envolvente de los edificios son diversas. Aunado a las capacidades que ofrecen las herramientas, métodos, materiales, sistemas constructivos, modelos de autonomía, administración de flujos de datos, entre otras variantes que han avanzado significativamente en las décadas recientes. La integración de modelos, que tienen a su disposición la integración de tecnología reciente, han ofrecido los medios de experimentación y desarrollo de envolventes cada vez más dirigidas hacia un espectro cada vez más amplio de funciones factibles de generar mejores vínculos con el contexto y los usuarios.

Asimismo, en las últimas décadas, los acontecimientos de crisis energética, cambios climáticos, entre otros, han contribuido al ciclo de retroalimentación e identificación colectiva de problemas a corto, mediano y largo plazo para las naciones. Algunos acontecimientos históricos como lo fue la crisis energética de la década de 1970's, con el antecedente de utilizar modelos de un consumo energético irracional, predominantemente desde la década de 1950's, conllevaron a sustituir modelos insostenibles por otros que brindan beneficios en común (Watson, 2013, p. 2). En contra parte, también tales acontecimientos son los medios que nos permiten evaluar la subsistencia del enfoque bajo el cual un modelo es desarrollado. En la actualidad la cooperación interdisciplinaria para generar nuevos modelos, con enfoques que trabajan en conjunción con las necesidades y exigencias contemporáneas: son una fuente importante de alimentación hacia los nuevos proyectos de investigación. Se generan e identifican nuevos problemas y soluciones que amplían y esclarecen los horizontes de las posibles aplicaciones arquitectónicas. Investigaciones recientes, llevadas a cabo por grupos interdisciplinarios de investigadores, han encontrado formas para incorporar fuentes de suministro de inputs a una respuesta dinámica (Krietemeyer, 2016, p. 233). Proyectos, como los desarrollados por *Hyperbody*,

mediante los cuales se tiene un acercamiento hacia el entendimiento tanto deductivo como inductivo de cada componente y su interacción con uno o varios sistemas, contribuyen en la comprensión holística de las aportaciones tecnológicas (Bier y Mostafavi, 2016, p. 255). Los recursos tecnológicos son catalizadores, que de usarse con el enfoque adecuado, se pueden obtener nuevos modelos de referencia. La secuencia propuesta por Victor Olgyay de tomar en consideración: los datos climáticos, el cuerpo humano, los diversos recursos tecnológicos y la aplicación en la arquitectura (1963, pp. 11-12); son conceptos que en la actualidad siguen teniendo repercusión.

Consiguientemente, el diseño bioclimático, al igual que los argumentos de Vitruvio en la publicación *De architectura*, tienen en consideración las condiciones únicas del lugar que ocupa la obra arquitectónica y las subsecuentes estrategias derivadas de un medio predecible. La bioclimática es la consideración de las condiciones climáticas para el desarrollo continuo de la arquitectura. El diseño bioclimático es un medio que brinda las estrategias para funcionar en armonía con el medio ambiente y adaptarse a las necesidades existentes de cada contexto con los recursos tecnológicos de su tiempo. Además de considerar la variabilidad del medio ambiente, es importante destacar que al igual que los modelos naturales y los procesos evolutivos, las resoluciones arquitectónicas están entrelazadas a su restricción temporal. Asimismo, es conveniente mencionar que la integración de tecnología innovadora no está condicionada a una amnesia de aportaciones del pasado (Stuart-Smith, 2014, p. 101). Un ejemplo son los modelos provistos por la naturaleza, algunos originados hace millones de años.

En la publicación de International Architectural Exhibition, Koolhaas, R., y Biennale di Venezia, número 14, en específico la sección de *elementos de la arquitectura* (pp. 187-345): se realizó un estudio de los elementos arquitectónicos y su desarrollo a través del tiempo. Asimismo, como cada componente puede estar sujeto a una estabilidad o periodo histórico de casi o nula modificación. También, se destaca por inferencia la importancia de generar modelos trascendentales, en contraparte a la tendencia de generar alteraciones a los elementos arquitectónicos. Referencia: International Architectural Exhibition, Koolhaas, R., y Biennale di Venezia. (2014). Fundamentals: 14th international architecture exhibition.

2.2

Concepto de envolvente cinética

La envolvente cinética es el funcionamiento sinérgico de distintos campos de conocimiento que tienen como convergencia el funcionamiento cohesivo de la envolvente, fundamentando la capacidad de movimiento de la envolvente para trabajar en conjunción con diversas variables. La diversidad de movimientos ofrece un rango de estrategias en relación a la o las variables introducidas en el control del sistema de la envolvente. Asimismo, los materiales seleccionados, el sistema constructivo utilizado, los mecanismos de automatización, la configuración de acciones de los algoritmos, las capacidades de intercambio de variables físicas, entre otras características, son componentes que forman el sistema de envolvente cinética.

Las condicionantes de la relación espacio-tiempo fusionada con los cambios del contexto, utilizados mediante la envolvente cinética, son modelos que necesitan de autonomía operativa. Los datos generados pueden ser masivos, en cambio no son un obstáculo para la adecuada manipulación y filtro para su posterior implementación. Incluso la inteligencia artificial ha intervenido en generar nuevos enfoques tecnológicos en relación con los problemas del siglo XXI (Lungarella, Iida, Bongard y Pfeifer, 2007, p. 6). Determinados datos procesados pueden ser utilizados para activar un material inteligente, posiblemente reactivo a un impulso eléctrico, es decir, electro activo. Los materiales inteligentes, están siendo desarrollados incluso hacia un enfoque de incorporación de inteligencia en la materia.

Por lo tanto, la envolvente debido a la disposición en los edificios y su relación con el medio circundante, tiene un rol preponderante en la función del edificio. La inclusión de tecnología procedimental, materiales inteligentes, procesos informáticos y diseño avanzado, amplían el espectro de posibilidades de actuación de la envolvente. Por consiguiente, la exploración de nuevos modelos de envolventes cinéticas nos pueden ofrecer nuevos enfoques de cómo utilizar variables que en un inicio se pueden considerar problemáticas, sin embargo pueden ser invertidas para su uso.

2.3

Interacciones de la envolvente cinética

En el futuro es muy probable que los edificios estén dotados de características multifacéticas, mediante el cual se aprovechen en toda la extensión el ciclo de transformación de la energía para determinadas áreas. Asimismo, la complejidad de la interacción de información y previsibilidad, así como el uso de modelos estadísticos y probabilísticos, serán parte fundamental en el criterio del diseño. Los cambios en el contexto social, político, económico y medio ambiental, resultarán en la optimización máxima de cada elemento, desarrollando modelos que correspondan a derivaciones filogenéticas que han pasado por procesos de evaluación y optimización, en relación estrecha con las condicionantes medio ambientales de cada región.

De esta manera la infraestructura, dotada de mayor interacción y eficiencia, integrará en mayor medida a los conjuntos edificatorios. Por lo tanto, si se considera el cambio paulatino hacia procesos complejos de interacción, combinación, evolución y eficiencia máxima, cada componente de nuestro mundo transformado o artificial en conjunto con el medio ambiente, estará dotado de un mayor intercambio de flujos de información. Asimismo, cada elemento tendrá el menor uso de materia, jerarquizando su utilidad por encima de su función estética.

La originalidad del proyecto radica en la prioridad de la transferencia de información, abstraído en datos, y subsecuentemente derivado en la manipulación del prototipo vinculado con las variables del medio ambiente. Realizando operaciones de diferenciación, unión y simetría.

En la publicación de Tadao Ando: *Conversaciones con Michael Auping* (2003), se menciona la importancia del concepto de la relación de la arquitectura y los límites: "... construir límites para la protección y luego abrirlos al movimiento" (p. 13). Los procesos de interacción, adaptación, transformación, entre otros, nos ofrecen diversos grados de manipulación de límites aceptables, de ser utilizados con ingenio, pueden favorecer al proyecto arquitectónico y su relación con el medio ambiente. Referencia: Auping, M., y Ando, T. (2003). *Tadao Ando: Conversaciones con Michael Aupin*, versión castellana Isabel Núñez. Barcelona: Gustavo Gili.

Consecuentemente, el potencial de uso en diferentes contextos mediante la adaptación, es una gran ventaja en contraste con los sistemas prioritariamente diseñados con componentes fijos y sin la opción de manipulación de factores externos e internos. Por lo tanto, las alternativas poseerán de flexibilidad para adaptarse a subsistemas que derivan de procedimientos, estrategias y materiales, construidas en una visión sistemática de funcionamiento. Uno de los valores agregados de la envolvente cinética es la implementación de estrategias mediante la periodicidad y la referencia constante de la intensidad de la radiación solar con la capacidad morfológica y de traslación del prototipo para adoptar diferentes modalidades de protección y/o permisibilidad. Además de sub-variar su función principal para la posible implementación de estrategias de enfriamiento de la masa térmica del edificio, durante la noche, y la reflexión directa y difusa de la luz natural hacia el interior del edificio, cuando las condiciones de temperatura lo permitan.

Los principales factores que intervienen por efectos de la radiación solar y que son variables factibles de manipular mediante la envolvente cinética pueden ser los siguientes:

“ Q_{s_w} Ganancia solar invernal (kWh);
 Q_{s_s} Ganancia solar en verano (kWh);
 Φ_o Temperatura Operativa ($^{\circ}C$);
 F_w Factor de reducción de ganancia solar en invierno (%);
 F_s Factor de reducción de ganancia solar en verano (%)” (Cellai,
Carletti, Scieurpi y Secchi, 2014, p. 86)

Como se puede observar con el ejemplo mencionado anteriormente de un posible control de la radiación solar hacia el interior del edificio, es necesario obtener un control sistémico. La capacidad de reacción es importante cuando se requiere de configurar y determinar el rango de inputs y outputs, asimismo la confiabilidad de respuesta ante el procesamiento de datos, la transferencia de la información y la operatividad del sistema en el contexto a emplearse. Es conveniente analizar la capacidad de reacción desde un enfoque deductivo e inductivo, es decir, desde el sistema operativo que activa y desactiva a menor o mayor intensidad los medios que intervienen en el mundo real. En otras palabras, es la transferencia de datos a actuadores. Por lo tanto, los materiales en conjunto con sus capacidades de funcionamiento, flexibilidad, escalabilidad, requerimientos de operatividad, sensibilidad de los sensores y factibilidad de aplicación, combinado con los microcontroladores y el software de interacción: son determinantes para elegir que medios de movilidad son los más adecuados para emplear ante determinadas variables.

Los distintos sistemas de envolventes arquitectónicas, dependiendo de su disposición espacial, jerarquizan la facilidad para solucionar determinados problemas. Es decir, la influencia del sistema de control, manual o automatizado, hasta el material de la protección solar. A continuación se muestra una tabla comparativa de los distintos sistemas de protección solar:

Tabla 1
Comparación de sistemas de protección solar

								
	Sin protección solar	Persianas enrollables internas	Persianas venecianas	Persianas en la cavidad de acristalamiento	Protecciones externas	Toldos exteriores	Persianas enrollables externas	Persianas venecianas externas
Fc (teoría)	1	0.75	0.75	0.75	0.5	0.4	0.3	0.25
Fc (práctica)	1	0.35	0.4	0.15	—	0.1-0.4	0.1-0.3	0.1
Costo de mantenimiento	—	Bajo	Bajo	Muy bajo	—	Muy alto	Muy alto	Alto
Visibilidad	Sin límite	Depende del material	Depende del ángulo	Depende del sistema	Sin límite	Depende de la configuración	Depende del material	Depende del ángulo
Deslumbramiento	Alto riesgo de deslumbramiento	Buena protección del deslumbramiento	Depende de la configuración del sistema de anti-deslumbramiento	Depende de la configuración del sistema de anti-deslumbramiento	Se requiere protección contra el deslumbramiento	Posibles diferencias altas en los niveles de iluminación	Protección contra el deslumbramiento	Posible brillo desde la parte inferior de las rejillas

Nota: Los datos fueron obtenidos de la **Tabla 4.8**, página 136, "**Comparison of solar screening systems**" del libro de: **Hausladen, G., Saldanha, Michael de y Liedl, P. (2008). ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy. Birkhauser; London: Springer, Basel.** * Asimismo, considerar que solamente se tomaron algunos parámetros del total presentado en la tabla de referencia.

Considerando la relevancia de la capacidad de un sistema cinético para responder ante problemas específicos en intervalos de tiempo heterogéneos, en comparación a la capacidad de respuesta de un sistema inmóvil con determinantes de diseño pre condicionadas: tienen distintos alcances de acciones y capacidades de realizar funciones para situaciones específicas. Asimismo, considerando la posibilidad de integrar materiales emergentes, sistemas inteligentes de operatividad, el proceso del diseño avanzado, entre otras características.

En el caso del prototipo de envolvente cinética, propuesto como proyecto de investigación, es factible utilizar polímeros iónicos electro activos y polímeros con memoria de forma, debido a las capacidades del material de reaccionar a agentes climatológicos sin la necesidad de la intervención de mecanismos sofisticados de movilidad para lograr movimientos complejos en los planos bidimensionales y tridimensionales. Ya sea configurando la estructura molecular del polímero, en el caso de los polímeros con memoria de forma, o la variación del suministro de voltaje, en el caso de los polímeros electro activos.

La permisibilidad selectiva en los edificios, son características que están siendo exploradas utilizando diferentes medios de movilidad. Los actuadores denominados suaves permiten una mayor movilidad y por lo tanto un mayor acercamiento a las características de regulación selectiva, análogo a las superficies de la naturaleza. En la actualidad la permisibilidad selectiva responde a criterios de inputs y outputs, procesados en uno o varios sistemas, otorgando el output procesado, determinado por la identificación de la abstracción de elementos del mundo real, generando una representación abstracta de la realidad. La envolvente construida con elementos fijos ofrece ventajas de protección ante las inclemencias climatológicas, sin embargo, cuando se necesita de controlar variables por periodos, transfiriéndolos a secuencias, se necesita de recurrir a la movilidad de los elementos en la envolvente.

Al emplear recursos pasivos y activos para formar un sistema híbrido, como medio de eficiencia energética, es indispensable utilizar fuentes energéticas renovables. Las alternativas de cosecha de energía posibilitan la incorporación de elementos piezoeléctricos, celdas solares, generadores eólicos, entre otras alternativas. Asimismo la división de funciones del prototipo por la periodicidad del día. Es decir, el funcionamiento del prototipo durante el día y la cosecha de energía durante la noche, además de la posibilidad de enfriar la masa térmica de los componentes del edificio durante la noche para la liberación del equilibrio térmico durante el día, cuando se requiera de un proceso de enfriamiento adicional, recurriendo a sistemas pasivos.

El análisis del establecimiento en un contexto en distintos periodos de la humanidad corresponde a los medios de transformación y sustento de la sociedad, economía y política. La comprensión del futuro de las ciudades, tal y como se argumenta en el concepto de *Ecopolis*, analizado la subdivisión de sus componentes como lo describe Downton en la publicación de *Ecopolis*, nos otorgan ciertas pautas de diseño a largo plazo:

“Proposición 1: CIUDAD-REGIÓN: La ciudad-región determina los parámetros ecológicos de la civilización.

Proposición 2: CONOCIMIENTO INTEGRADO: Los conceptos de eco-ciudad generan un imperativo para integrar conocimiento existente.

Proposición 3: CAMBIO CULTURAL: Creación de una civilización ecológica requiere conciencia, un cambio cultural sistemático.

Proposición 4: FRACTALES URBANOS: Los proyectos demostrativos proveen de significado para catalizar el cambio cultural” (2009, p. 25).

Un edificio, aunque sea una fracción de la ciudad, tiene un significado ontológico, capaz de transferir modelos de referencia, si se hace uso del desarrollo tecnológico y se implementan estrategias de diseño en conjunto con el medio ambiente.

Unas de las características de las infraestructuras de las próximas generaciones son descritas por Brown, en la publicación de *Next Generation Infrastructure*, describiendo el cambio de paradigma de la infraestructura orientado a la comprensión de los sistemas de la naturaleza:

1. “Los sistemas deben ser multipropósito, interconectados, y sinérgicos.
2. La infraestructura debe contribuir en poco o nada en emisiones de carbono.
3. La infraestructura debe trabajar con los procesos naturales.
4. La infraestructura debe mejorar los contextos sociales y servir circunscripciones locales.
5. La infraestructura debe ser resiliente y adaptarse a cambios anticipados traídos por un clima global inestable” (2014, p. 11).

En general, las interacciones con diversos componentes permiten que las funciones puedan ser flexibles o susceptibles a ciclos de retroalimentación. Las interacciones proveen de una relación recíproca entre lo intangible (información) y lo tangible (materia), mediante el diseño avanzado. La envolvente cinética, debido a sus características de movilidad en relación a cambios de variables seleccionadas, tiene en su contexto de actuación cambios jerarquizados. La jerarquía puede ser desde las condicionantes físicas de un lugar hasta el vínculo con la ciudad, todo con sus debidas limitaciones.

Tabla 2

Ejemplos de Envolventes Cinéticas

Al Bahr Towers	<p>Descripción: La posibilidad de configurar los triángulos, mediante los distintos rangos de apertura. Adaptación a una superficie curva mediante nodos, y la posterior subdivisión en triángulos. Asimismo, se destaca la automatización mediante scripts en Java, permitiendo el continuo monitoreo.</p>
Ubicación: Abu Dhabi	
Año: 2013	
Firma: Aedas Architects	
Tipo: Comercial / Oficinas	
CJ R&D Center Kinetic Façade	<p>Descripción: Se destaca el uso de un sistema mecánico de movimiento, análogo al movimiento de traslación de las sombrillas. Asimismo, el uso de actuadores lineales para lograr el movimiento transversal. La regulación se obtiene al reducir o incrementar la sección del mecanismo de envolvente.</p>
Ubicación: Seúl, Corea del Sur	
Año: 2011	
Firma: YAZDANI STUDIO	
Tipo: Comercial	
Edificio Media-Tic	<p>Descripción: La variabilidad del volumen de cada módulo elaborado con ETFE, hace posible la transformación y adaptación en relación a los diversos requerimientos. Al igual que, la integración de los módulos en una malla triangular unida mediante nodos móviles ubicados en los entresijos.</p>
Ubicación: Barcelona, España	
Año: 2010	
Firma: Enric Ruiz Geli	
Tipo: Oficinas	
Fachada Homeostática	<p>Descripción: El uso de polímeros electro-activos como actuadores, facilitan el movimiento de la fachada con un enfoque de un sistema de regulación homeostático. También, la implementación del material plateado, favorece la capacidad de regulación.</p>
Ubicación: Proyecto conceptual / E.U.A	
Año: 2014	
Firma: Decker Yeadon	
Kiefer Technic Bad Gleichenberg	<p>Descripción: Las distintas fases de movimiento, le brindan al sistema un carácter de movilidad inteligente. Asimismo, las piezas y los diversos patrones de apertura favorecen la regulación de condiciones deseadas al interior del edificio.</p>
Ubicación: Estiria, Austria	
Año: 2007	
Firma: Ernst Giselsbrecht + Partner ZT GmbH Graz	
Tipo: Comercial	
Pabellón Temático Expo Yeosu-KR 2012	<p>Descripción: La capacidad de las franjas para distorsionar su forma, en relación a las fuerzas implementadas primordialmente en los extremos, proveen de diversos rangos de apertura. Asimismo, el uso de LED's durante la noche, incrementan el valor interactivo con los usuarios.</p>
Ubicación: Yeosu, Corea del Sur	
Año: 2012	
Firma: Soma ZT GmbH	
Tipo: Pabellón	
RMIT Design HUB, RMIT University	<p>Descripción: Se destaca el uso de discos de cristal con un eje de rotación vertical. Se emplearon elementos relativamente sencillos, sin embargo, en su conjunto se logra una distinción de carácter experimental, relacionado con las actividades desarrolladas en el interior.</p>
Ubicación: Melbourne, Australia	
Año: 2007	
Firma: Sean Godsell Architects en asociación con Peddle Thorpe Architects	
Tipo: Cultural	

2.4

Influencias de la biomimética

La biomimética, también conocido como biónica (Bionik), comprende en su ejercer la “imitación” de los modelos de la naturaleza desde distintos enfoques. El término “imitar” no es del todo apropiado, debido a los avances de la biomimética, es decir, no es una simple imitación de la forma. En constraste, la biomimética posibilita la generación de abstracciones y conceptos, en rangos desde los procedimientos hasta la creación de nuevos materiales. Uno de los primeros en describir el término de biónica fue J. E. Steele en 1960 (Gleich, Pade, Petschow y Pissarskoi, 2010, p. 14). La biomimética puede ser dividida en tres conjuntos de los cuales se subdividen en subconjuntos, Werner Nachtigall clasifica la biomimética en tres conjuntos de los cuales realiza una subdivisión integradas por doce subconjuntos. A continuación se realiza la descripción de la clasificación:

Conjuntos principales;

- > “Biónica estructural:
Construcciones de la naturaleza, estructuras, materiales.
- > Biónica procedimental:
Los procedimientos de la naturaleza o procesos.
- > Biónica informativa:
Principios del desarrollo, evolución y transferencia de información”. (Gruber, 2011, p. 16)

Sub-conjuntos derivados:

- > “Biónica de las estructuras [Strukturbiionik] (La biónica de los materiales)
Elementos biológicos estructurales, materiales y superficies.
- > Biónica de los artefactos
Desarrollo del uso en general en la construcción.

- > Biónica estructural [Konstruktionsbionik]
Construcciones biológicas, cercanamente relacionada con biónica de las estructuras y biónica de los artefactos.
- > Antropobiónica (robótica biónica, biónica protésico)
Asuntos de la interacción humana/maquina, ergonomía.
- > Biónica constructiva [Baubionik]
Construcciones ligeras ocurriendo en la naturaleza, construcciones decables, membranas y cascarones, construcciones transformables, revestimientos de hoja, uso de superficies, etc.
- > Biónica climática (biónica energética)
Conceptos de ventilación pasiva, enfriamiento y calentamiento.
- > Biónica sensorial
Detección y procesamiento de estimulación física y química, localización y orientación dentro de un medio ambiente.
- > Biónica de la locomoción (biónica cinemática y dinámica)
Caminar, nadar y volar como formas primarias de movimiento. Interacción con el ambiente circundante.
- > Neurobiónica
Análisis de datos y procesamiento de información.
- > Biónica evolucionaria
Técnicas evolucionarias y estrategias evolucionarias, hacer utilidades para la tecnología.
- > Biónica procedimental
Fotosíntesis, tecnología de hidrogeno, reciclaje.
- > Biónica organizativa
Relaciones complejas de los sistemas biológicos". (Nachtigall, 1998, p. 19)

Como se puede observar en la clasificación anterior, la biomimética tiene un rango amplio de funciones en relación a diversos problemas. Las opciones son varias, desde la generación de meta materiales con posibles configuraciones biológicas (Larsson y Kaiser, 2014, p. 94). Incluso se pueden tomar mecanismos simplificados de movimiento, sumamente útiles, como por ejemplo los conos de coníferas. La activación moderada de abertura de los conos de coníferas están en relación a las condiciones de humedad del ambiente (Pohl y Nachtigall, 2015, p. 276). Modelos análogos a las plantas pueden ser de utilidad en los futuros proyectos de envolventes. Las plantas pueden activar distintos mecanismos en respuesta a una posible afectación, asimismo, en relación a las características y tiempo de afectación (Chelli-Chaabouni, 2014, p. 10). Determinados mecanismos de las plantas pueden ser utilizados como parámetros en nuevos sistemas. Por ejemplo, puede ser un sistema de protección solar con parámetros específicos que determine la abertura por su disposición espacial e intervenga en las propiedades físicas de la incidencia solar (Jang, Lee y Kim, 2013, pp. 15-16). Los principios paramétricos, inclusive pueden ser utilizados en relación a las características resultantes de experimentos de resistencia de los materiales para su posterior uso en relaciones geométricas.

Por consiguiente, la biomimética incorpora modelos de la naturaleza, evaluándolos en sus funciones, procedimientos, materiales y estructuras. El valor de la biomimética concierne también en la facilidad de adaptación al entorno (medio ambiente). El enfoque biomimético ayuda a orientar los conceptos y diseño de los objetos, integrando ideas acordes a los nuevos avances y problemas del siglo XXI. La biomimética puede ser de utilidad para el desarrollo de la envolvente arquitectónica, con características cinéticas. Debido a la multiplicidad de funciones que puede desempeñar utilizando como fuente de administración los recursos renovables. Asimismo, la biomimética puede resultar de gran utilidad para brindarle al sistema cinético de una mayor cohesión conceptual desde un origen.

Referencias

Auping, M., y Ando, T. (2003). *Tadao Ando: Conversaciones con Michael Aupin*, versión castellana Isabel Núñez. Barcelona: Gustavo Gili.

Bier, H. H. y Mostafavi, S. (2016). Robotic Building as Physically Built Robotic Environments and Robotically Supported Building Processes. En Dalton, N. S., Schnädelbach, H., Wiberg, M. y Varoudis, T. (Eds.), *Architecture and Interaction: human computer interaction in space and place* (pp. 253-271). Suiza: Springer.

Brown, H. (2014). *Next Generation Infrastructure: Principles for Post-Industrial Public Works*. Washington: ISLANDPRESS.

Cellai, G., Carletti, C., Sciarpi, F., y Secchi, S. (2014). Transparent Building Envelope: Windows and Shading Devices Typologies for Energy Efficiency Refurbishments. En Magrini, A. (Ed.), *Building Refurbishment for Energy Performance: A Global Approach*. Londres: Springer.

Chelli-Chaabouni, A. (2014). Mechanisms and Adaptation of Plants to Environmental Stress: A Case of Woody Species. En Ahmad, P. y Wani, M. R. (Eds.), *Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment* (Vol. 1, pp. 1-24). Nueva York: Springer.

Downton, P. F. (2009). *Ecopolis: Architecture and Cities for a Changing Climate*. Dordrecht: Springer y CSIRO.

Gleich, A. von., Pade, C., Petschow, U., y Pissarskoi, E. (2010). *Potentials and Trends in Biomimetics*. Berlin: Springer.

Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*. Nueva York: Springer.

Hausladen, G., Saldanha, Michael de y Liedl, P. (2008). *ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy*. Birkhäuser; London: Springer, Basel.

International Architectural Exhibition, Koolhaas, R., y Biennale di Venezia. (2014). *Fundamentals: 14th international architecture exhibition*.

Jang, Sun-Young., Lee, S. y Kim, Sung-Ah. (2013). Collaborative Responsive Façade Design Using Sensor and Actuator Network. En Luo, Y. (Ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering: 10th International Conference, CDVE 2013; Alcudia, Mallorca, Spain, September 22-25* (pp. 11-18). Berlin: Springer.

Krietemeyer, B. (2016). An Interactive Simulation Environment for Adaptive Architectural Systems. En Dalton, N. S., Schnädelbach, H., Wiberg, M. y Varoudis, T. (Eds.), *Architecture and Interaction: human computer interaction in space and place* (pp. 231-252). Suiza: Springer.

Larsson, M., y Kaiser, A. (2014). Invincible Cities for the Materiomic Age. En Rassia, S. Th. y Pardalos, P. M. (Eds.), *Cities for Smart Environmental and Energy Futures: Impacts on Architecture and Technology* (pp. 53-97). Londres: Springer.

Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J. C. y Pfeifer, R. (2007). AI in the 21st Century-With Historical Reflections. En Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J. y Pfeifer, R. (Eds.), *50 Years of Artificial Intelligence: Essays Dedicated to the 50th Anniversary of Artificial Intelligence* (pp. 1-8). Berlin: Springer.

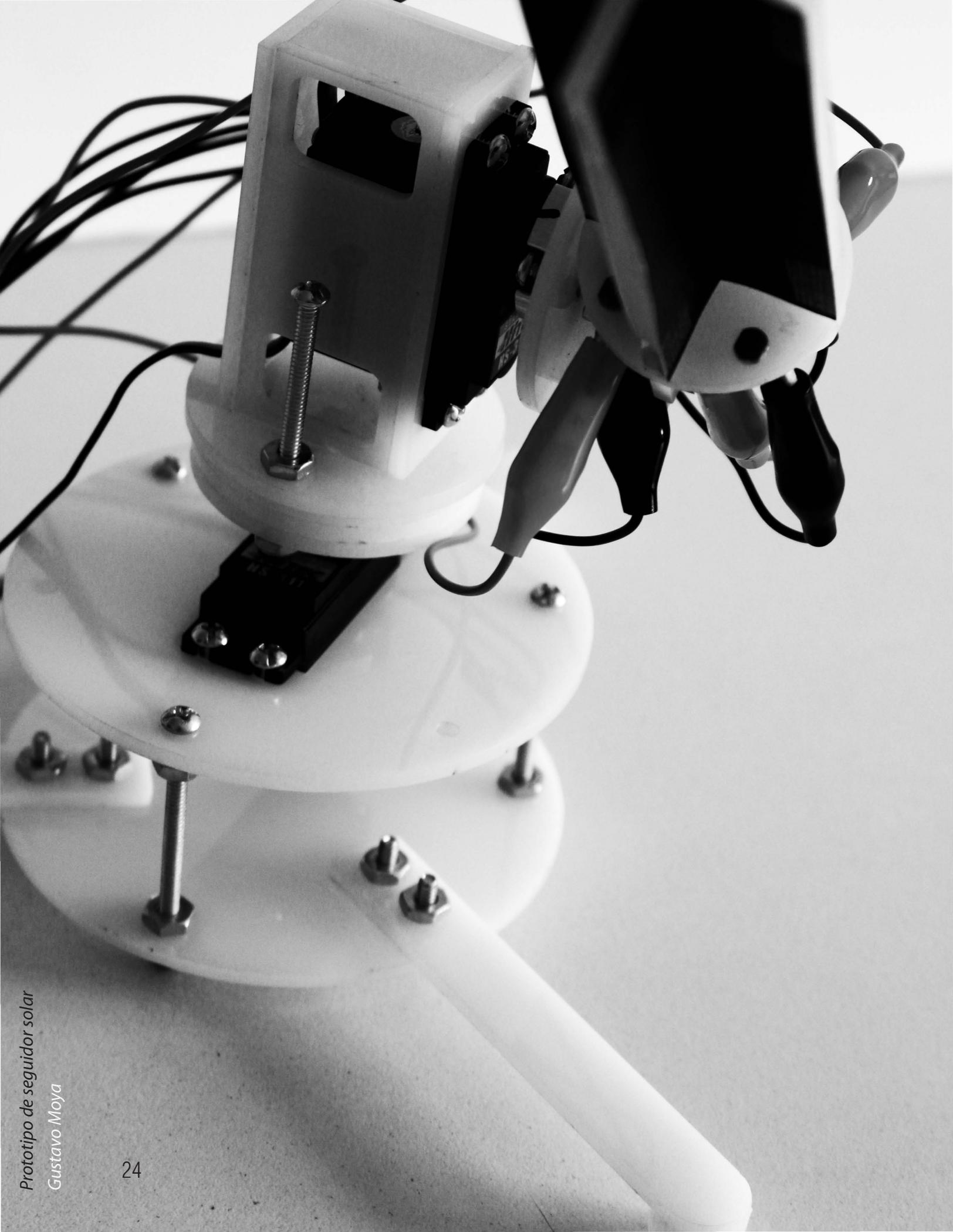
Nachtigall, W. (1998). *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin: Springer.

Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architecture Regionalism*. New Jersey: Princeton University Press.

Pohl, G. y Nachtigall, W. (2015). *Biomimetics for Architecture & Design: Nature-Analogies-Technology*. Londres: Springer.

Stuart-Smith, R. (2014). Qualitative Affects of Building Life Cycle: The Formation of Architectural Matter. En Rassia, S. Th. y Pardalos, P. M. (Eds.), *Cities for Smart Environmental and Energy Futures: Impacts on Architecture and Technology* (pp. 99-111). Londres: Springer.

Watson, D. (2013). Bioclimatic Design. En Loftness, V. y Haase, D. (Eds.), *Sustainable Built Environments* (pp. 1-68). Nueva York: Springer.



La envolvente cinética en conjunción con el medio ambiente



La envolvente arquitectónica es un medio importante de filtro de variables en relación a su ubicación, es decir, las condiciones medio ambientales y sus características locales. La envolvente es más que una presentación estética del edificio, en cambio, tiene un amplio rango de funciones. Las formas de la envolvente pueden ser diversas: superficies de una curva, superficies de múltiples curvas, entre otras tipologías. Inclusive, compuesta por diversas capas con funciones interrelacionadas. La envolvente de los edificios, por lo tanto, de cierto modo es la concentración de espacio con capacidades de modificar el intercambio entre variables de un contexto a otro, actuando como una barrera selectiva.

La consideración de las variables del medio ambiente es indispensable para un funcionamiento armonioso en colaboración con el edificio. Ahora bien, la variabilidad del medio ambiente puede ser un recurso problemático para aquellos agentes que no toman en consideración el cambio de los fenómenos meteorológicos. En contraparte, de considerarse los cambios meteorológicos como un recurso activo factible de ser aprovechado, los beneficios pueden ser mutuos. A continuación se describen algunos conceptos e ideas de utilidad y de referencia para el desarrollo de la envolvente cinética.

En la publicación de “Ecodesign for Cities and Suburbs” de Jonathan Barnett y Larry Beasley (2015, pp. 1-20) ejemplifican la necesidad de desarrollar vínculos entre el edificio y el contexto. Al igual que el uso del cambio y el desarrollo tecnológico, con la finalidad de explorar el funcionamiento armonioso entre la introducción de lo artificial con el medio ambiente. Barnett, J., y Beasley, L. (2015). *Ecodesign for Cities and Suburbs*. Washington: Island Press.

3.1

Diversidad de estrategias en conjunción con la variabilidad del medio ambiente

Mediante sistemas de control inteligentes incorporados a los edificios se puede aprovechar la variabilidad del medio ambiente, en conjunción con las necesidades de la arquitectura. La implementación de estrategias bioclimáticas, mediante un constante monitoreo y ejecución de acciones automatizadas, es posible utilizar los cambios provistos por el medio ambiente como recurso activo para generar cambios favorables en el interior del edificio. En la actualidad el procesamiento de datos y transferencia de información tienden a ser evaluados e implementados con mayor relevancia. Incluso se destaca el concepto de “detalle invisible”, caracterizado por un diseño con relevancia en sus funciones avanzadas llevadas a cabo por medios predominantemente intangibles (Ratti y Claudel, 2014, p. 90).

Los sistemas de procesamiento de información tienen en la actualidad la capacidad de hacer interactuar flujos de información masivos, enfocando su utilidad en gran medida al dialogo entre el componente tecnológico y el contexto social, económico, político y medio ambiental. Son orientados más allá de la materialidad o sumatoria de avances tecnológicos. En contraste, son la representación de una constante búsqueda de integración y coherencia de sistemas abiertos orientados hacia el ámbito de sistemas denominados inteligentes con capacidades de autonomía y adaptabilidad para uno o varios beneficios colectivos. Asimismo, la utilidad de los datos para realizar modelos cada vez más apegados a la representación abstracta de la realidad a través del tiempo.

La exploración de cambios en la forma arquitectónica en relación a uno o más variables, fortalecen la idea de un medio de interconexión entre lo intangible (datos) y lo tangible (materia). La forma dinámica posibilita la relación de efectos y causas, en una primera instancia y posteriormente en sistemas inteligentes con múltiples funciones. La forma en constante cambio, denominado “forma dinámica”, argumenta que “el cambio de la forma en arquitectura es el resultado de la morfogénesis, el cual ya no es estático sino un proceso constante dinámico de interacción entre el edificio y el medio ambiente” (Gruber, 2011, p. 135). La experimentación de la interacción y cambios de forma en correspondencia al medio ambiente, han contribuido en diferentes enfoques como el denominado “hyperbodies” (Oosterhuis, 2003).

Debido a la multiplicidad de funciones que puede desplegar la envolvente cinética, al igual que las variables factibles de manipularse, se delimitaron las variables a controlar. A continuación se describen algunas de las variables y se menciona la posible relación con el sistema de envolvente cinética propuesto para desarrollar a nivel de prototipo.

3.1.1

Radiación solar

La envolvente cinética al operar mediante la regulación de parámetros de la radiación solar, es primordial comprender la variabilidad y principios de la radiación solar. El Sol tiene una producción estimada de aproximadamente 3.9×10^{26} watts (W) (Brooks, 2008, p. 5), de la cual el 30% de la energía solar es reflejada al espacio, el 47% es absorbida por la atmosfera, el 23% da fuerza al ciclo del agua, menos del 1% estimula las corrientes de viento y menos del 0.2% es utilizado en proceso de la fotosíntesis (Behling, Behling S. y Schindler, 1996).

En promedio se registra $1,417 \text{ W/m}^2$ durante el perihelio y $1,324 \text{ W/m}^2$ durante el afelio (Brooks, 2008), en los límites de la atmosfera, del cual solamente un porcentaje alcanza la superficie terrestre, debido a los distintos fenómenos climatológicos y a la contaminación. Sin embargo, la cantidad de energía emitida por el Sol es enorme, “el total de la energía solar que alcanza la superficie de la Tierra en 1 día equivale a 2,000 veces la energía consumida por los humanos durante todo el año” (Vita-Finzi, 2008, p.122).

La definición de “radiación solar” por la Enciclopedia Británica es la siguiente:

“Radiación solar, radiación electromagnética, incluyendo rayos-X, ultravioleta y radiación infrarroja, y emisiones de radio, así como luz visible, emanando desde el Sol. De los 3.8×10^{33} ergios emitidos por el

Sol cada segundo, cerca de 1 parte en 120 millones es recibido por sus planetas orbitantes y sus satélites. La pequeña porción de esta energía interceptada por la Tierra (la constante solar, un promedio de 1.4 kilowatts por metro cuadrado) es de gran importancia para la vida y para el mantenimiento de los procesos naturales en la superficie terrestre... el Sol irradia alrededor de 8 kilowatts por centímetro cuadrado de su superficie” (Zirin, 2008).

La atmosfera Terrestre compuesta predominantemente de N₂ (78.08%) y O₂ (20.95%): ambos acumulando un total aproximado del 99.03% (Brooks, 2008, p. 8). Compuesta a su vez por indicios de gases en la atmosfera de H₂O (0 - 4%), CO₂ (370 ppm), O₃ (0.04 ppm), CFCs (0.0002 ppm), entre otros gases (Brooks, 2008, p. 8): son variables que intervienen en la radiación solar registrada en la superficie de la Tierra.

La radiación solar incide en la Tierra mediante distintos espectros electromagnéticos de los cuales está compuesto por: radiación visible (luz visible), rayos ultravioletas y rayos infrarrojos, “el 3% de la energía llega en forma de radiación ultravioleta, el 53% en el espectro visible y el 44% en el campo infrarrojo” (Paricio, 1999, p.12). La atmosfera tiene un espesor aproximado de 30 km medido desde la superficie de la Tierra, afectando la intensidad de la radiación solar en su paso hasta la incidencia en la superficie de la tierra (Norton, 2014, p. 9). En los planos inclinados, la radiación solar incidente está compuesta por la radiación directa, la radiación difusa proveniente de la bóveda celeste y de la radiación solar reflejada de la superficie de la Tierra (Gueymard y Myers, 2008, p. 4).

En la publicación de “Sol Power: The Evolution of Solar Architecture” de Sophia y Stefan Behling en colaboración con Bruno Schindler (prólogo de Sir Norman Foster), (1996), pp. 25-39; en especial pp. 30-31; se describe la eficiencia de las plantas y células para aprovechar la energía solar en distintos niveles de transformación. Asimismo, la hojas de *Robina pseudoacacia*, descrita en p. 31, son un ejemplo de la consideración del cambio en relación al transcurso del día. Referencia: Behling, S., Behling, St. y Schindler, B. (1996). *Sol Power: The Evolution of Solar Architecture*. Munich: Prestel.

Tabla 3

Espectro Electromagnético

Caracterización	Longitud de onda
Rayos cósmicos	<0.3 pm
Rayos gamma	0.3-100 pm
Rayos X	0.01-30 nm
Luz ultravioleta	3-400 nm
Luz visible	0.4-0.7 μm
Radiación de infrarrojo cercano	0.7-30 μm
Radiación de infrarrojo lejano	30-1000 μm
Ondas milimétricas	1-10 mm
Microondas	10-300 mm
Ondas cortas de radio y televisión	300 mm-100 m
Ondas largas de radio	100 m-30 km

Fuente: Los datos de la tabla fueron obtenidos de la tabla 1.2 "Forms of the electromagnetic wave spectrum" de la siguiente referencia: Lienhard IV, J. H. y Lienhard V, J. H. (2008). A HEAT TRANSFER TEXTBOOK, tercera edición. Phlogiston Press.

La cantidad de luz emitida por el Sol en relación al eje de la Tierra y su órbita alrededor del Sol durante el transcurso del año, afectan las condiciones atmosféricas, creando diferencias de temperatura que generan movimientos atmosféricos en conjunto con multivariadas condiciones climáticas. Asimismo, las variables del medio físico natural han sido parámetros para modificar durante siglos en la arquitectura. Es decir, la arquitectura ha sido perfeccionada según las condiciones específicas deseadas y necesarias en sus distintos entornos de acuerdo a su emplazamiento. Además, como se describió anteriormente, el Sol es una fuente energética predominante en la Tierra. Sin embargo, su uso no ha sido del todo aprovechado. La sustitución de fuentes de energía fósiles por energías renovables delimita la usabilidad a largo plazo de modelos de funcionamiento acordes a la jerarquía de recursos disponibles. En contraste, aquellos modelos que consideran la usabilidad del recurso de la radiación solar como un medio de recurso en el sistema de operación, tienen más posibilidades de vincular soluciones a un largo plazo. Por consiguiente, la generación de modelos que implementen soluciones utilizando los recursos renovables, como lo puede ser la envolvente arquitectónica, pueden contribuir a soluciones compatibles con los recursos disponibles de cada región.

3.1.2

Ventilación natural

El viento es generado por las distintas diferencias de presión del aire en la atmósfera, generándose flujos proporcionales a los diferenciales de presión, asimismo, influenciados por los distintos obstáculos o grados de rugosidad en las superficies y el efecto *Coriolis* descrita por el ingeniero y matemático francés Gustave-Gaspard Coriolis, en 1835. El movimiento de rotación de la Tierra influye en la dirección de los fenómenos meteorológicos, como lo describe la *Enciclopedia Británica*: “una fuerza de inercia...la desviación Coriolis es por lo tanto, relacionado al movimiento del objeto, el movimiento de la Tierra, y la latitud”.

La definición de “viento” por la Enciclopedia Británica es la siguiente:

“Viento, en climatología, el movimiento del aire relativo a la superficie de la Tierra. El viento ocurre por las diferencias (gradientes) verticales y horizontales en la presión atmosférica. Por consiguiente, la distribución de los vientos está estrechamente relacionada por la presión. Cerca de la superficie de la Tierra, el viento generalmente fluye alrededor de regiones de relativamente baja y alta presión – ciclones y anticiclones, respectivamente” (Eds. de la Enciclopedia Británica, 2016).

El viento ha sido utilizado a lo largo del tiempo como fuente energética de acción sobre el transporte marítimo, bombas extractoras impulsadas por el viento, entre otros inventos que han optimizado la utilización del viento en los artefactos y maquinaria, diseñada para tomar el máximo provecho de la energía del viento, ingeniando maquinarias cada vez más sofisticadas (Mathew, 2006, pp. 2-6). Al igual que el uso de Torres de Viento (*Baudgeers*), han sido utilizados en el Medio Oriente como intercambiadores selectivos de flujos de aire entre el interior y exterior de los edificios, mediante sistemas pasivos de ventilación, consecuentemente las torres de viento han cambiado de forma y han sido configurados para obtener resultados específicos, acorde a las necesidades y condiciones del sitio (Bahadori y Dehghani-sanij, 2014, pp. 1-8). Las distintas aplicaciones que el ser humano ha ideado para tomar ventaja de las condiciones del viento, han requerido del estudio escrupuloso y metódico de los flujos de corrientes primarias y secundarias (locales).

Uno de los indicadores usualmente utilizados es la escala de Beaufort, en el cual se hace una relación de la velocidad del viento medido en knots que equivale a $1.852 \text{ km/h} = 1 \text{ knot}$, a una altura de 10 mts. Debido a las distintas condiciones de rugosidad urbana o natural, la intensidad del viento tiene variaciones. La escala de Beaufort es utilizada como referencia para determinar las afectaciones en un contexto específico en relación a la intensidad del viento y su periodicidad.

El viento generalmente es representado mediante una tabla de datos de frecuencia, dirección, intensidad, periodicidad, fuente potencial energética, probabilístico, promedio, entre otras posibilidades de registrar y predecir el viento. Algunos de los instrumentos empleados son los anemómetros y veletas, utilizados para registrar la dirección y velocidad del viento.

Durante el transcurso del tiempo se han estudiado los efectos del viento de las cuales podemos destacar los siguientes, acorde al trabajo *City and Wind Climate as an Architectural Instrument* de Krautheim, Pasel, Pfeiffer y Schultz-Granberg (2014), en el cual realizan la siguiente línea del tiempo:

- > Gandemer estudio el flujo del viento alrededor de los edificios en tuneles de viento e hizo visible las estelas mediante un método de lámina. El identifico doce efectos aerodinámicos y escribió una guía para arquitectos y proyectistas. 1973
- > Hussain & Lee condujeron una investigación de las fuerzas del viento en elementos de rugosidad tridimensional en un margen atmosférico simulado de capas de flujo. 1980
- > Brown y DeKay remitieron a los estudios de Hussain y Lee (1980) validando los tres regímenes de flujos fundamentales complementados con numerosos casos de estudio. 1985
- > Basado en los estudios de Hussain y Lee (1980), la investigación de los desfiladeros de las calles y patios fue altamente influenciado por Oke y la postulación de tres regímenes de flujo. 1988

- > Uno de los primeros estudios numéricos basados en flujos dinámicos computacionales fue hecho por **Walker, Shao, Wolliscroft** con el enfoque de ventilación natural en los patios. 1993
- > Cubriendo varias escalas **Hanqing Wu** investigó el viento del medio ambiente alrededor de edificios aislados, grupos de edificios y el micro-clima urbano para vecindarios completos. El flujo de patrones en el túnel de viento fueron hechos visibles por la mezcla de fluidos como aceite de parafina con polvo de caolín. El confirmo y refino los principios de Gandemers. 1994
- > En la búsqueda de aspectos ecológicos en los edificios, **Daniels** contribuyo con ideas valiosas en la aerodinámica de edificios aislados, pero además mencionó y validó los regímenes de flujo en los desfiladeros de las calles. 1995
- > En relación específica a un desfiladero de una calle de 40 mts de ancho **Baiky Kim** exploraron la circulación del aire y el surgimiento de múltiples vórtices enfocándose en las relaciones de flujos coladizos de patios estrechos. 1998
- > En la búsqueda de la comparación entre simulaciones numéricas y estudios de túnel de viento **Kovar-Panskus, et. al.** investigaron la formación de vórtices y la fiabilidad de los modelos de estudio. 2002. (pp. 76-77)

En la actualidad, la utilidad de las simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tienen la ventaja de evaluar, mejorar y seleccionar las características buscadas en el diseño. Las simulaciones mediante CFD facilitan la puesta a prueba de ideas y su contexto. Son una herramienta efectiva para diseñar espacios arquitectónicos con una buena calidad de ventilación natural. La colocación estratégica de elementos en la envolvente o la disposición y orientación de los componentes, pueden aumentar significativamente la efectividad de la ventilación natural al interior de los edificios. Asimismo, se puede aumentar la periodicidad e intensidad de la ventilación natural en los espacios arquitectónicos, con las características deseadas. Aunado a las características de una envolvente cinética para favorecer determinada posición de la superficie y re-direccionar el viento hacia zonas específicas o generar efectos de extracción de aire en los edificios.

3.1.3

Estrategias de enfriamiento y calentamiento

Mediante distintas estrategias de protección implementadas por medio de la envolvente, es posible brindar un rango de actuación en conjunción con diversas variables. Una de las variables seleccionadas es la incidencia de radiación solar hacia el interior del edificio. Las diferentes disposiciones espaciales realizadas mediante la envolvente, en intervalos de tiempo selectivos brindadas mediante las características cinéticas, buscan diversificar las estrategias a implementar. Asimismo, la consideración de los distintos fenómenos de transferencia de calor como lo son la evaporación, la radiación, la conducción y convección, deben ser considerados al analizar la diversidad de sistemas de protección o permisibilidad.

La envolvente cinética tiene como repercusión en su función la regulación óptima del confort térmico de los ocupantes. Se consideran los valores de confort térmico en rangos, debido a la dificultad y heterogeneidad de condicionantes de confort de los usuarios. Consecuentemente, el modelo de *Fanger's de Predicted Mean Vote (PMV)*, combina cuatro variables físicas: la velocidad del viento, la temperatura media radiante, la temperatura del aire y la humedad relativa (Charles, 2003, p. 5).

Es conveniente destacar la relevancia de los materiales para generar cambios en relación a estímulos específicos. En la publicación de Peters Sascha "Material Revolution: Sustainable and Multi-Purpose Materials for Design and Architecture" (2010, pp. 122-132) se muestran algunos de los materiales emergentes factibles de aplicarse en los proyectos arquitectónicos, vinculando por ejemplo funciones de enfriamiento o calentamiento. Referencia: Peters, S. (2010). *Material Revolution: Sustainable and Multi-Purpose Materials for Design and Architecture*. Berlin: Birkhäuser.

A continuación se describen los rangos de confort térmico y sus condiciones:

Tabla 4

Confort Térmico

Temporada	Temperatura óptima	Rango de temperatura aceptable	Inclusión de variables a considerar
Invierno	22°C	20-23°C	Humedad relativa: 50%
			Velocidad relativa media: <0.15 m/s
			Temperatura media radiante: equivalente a la temperatura del aire
			Ritmo metabólico: 1.2 met
			Aislamiento de la ropa: 0.9 clo
Verano	24.5°C	23-26°C	Humedad relativa: 50%
			Velocidad relativa media: <0.15 m/s
			Temperatura media radiante: equivalente a la temperatura del aire
			Ritmo metabólico: 1.2 met
			Aislamiento de la ropa: 0.5 clo

Fuente: Los datos de la tabla están basados en los datos de ASHRAE *Standard 55* (1992, p. 4), tomando como referencia la figura 2 de Charles (2003, p. 7).

El color es una de las variables a considerar, con la finalidad de determinar los niveles de reflexión deseados de una superficie, así como la posibilidad de absorción en determinados periodos. El parámetro de reflexión del pigmento cromático está en estrecha relación con la ganancia de calor y su correspondiente reflexión determinado por su espectro. El blanco es la mejor opción si se quiere reflejar la radiación solar, y el negro si se desea absorber el espectro de radiación solar. Asimismo, se debe tomar en consideración los pigmentos cromáticos y acromáticos intermedios.

La reflexión de distintas superficies, caracterizadas por su rugosidad, tiene efectos directos en la forma que reflejan la luz, diferenciándose desde un rango de difuso a directo.

“Mate: parece una superficie áspera (o estructurada); esta apariencia es causada por la reflexión difusa completa (o parcial) de la superficie; Muy brillante: parece una superficie reflectante muy lisa; tal superficie induce solamente la reflexión directa, que es llamada reflexión de espejo, brillo de espejo, o simplemente brillo. Este comportamiento es descrito por la ley de reflexión” (Klein, 2010, p. 59)

Igualmente, otra de las variables a considerar es la densidad del material, la conductividad térmica y su capacidad térmica. Por lo tanto, al analizar las características, propiedades de cada material y su disposición espacial, se generan parámetros vinculados a las características de la envolvente con su dimensión temporal (cinética). La reflexión de las superficies, la orientación de la superficie, la protección solar proyectada en el edificio, la posición óptima en el espacio para la cosecha de energía, entre otras características, son algunos de los parámetros posibles de manipular mediante sistemas inteligentes implementados con la envolvente arquitectónica.

Coefficiente de sombreado, coeficiente de ganancia de calor solar, transmitancia visible y valor-U

El coeficiente de sombreado, conocido como *Shading coefficient* (SC), es la relación que existe entre el sistema de protección solar otorgado a un espacio interior de referencia. En la actualidad el término de coeficiente de sombra ha avanzado en su complejidad de valoración adoptando el término de *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC). Sin embargo, se toma como referencia para posteriormente analizar el SHGC, debido a la cuantificación de la equivalencia aproximada de ambos al multiplicar por 0.87 el SC.

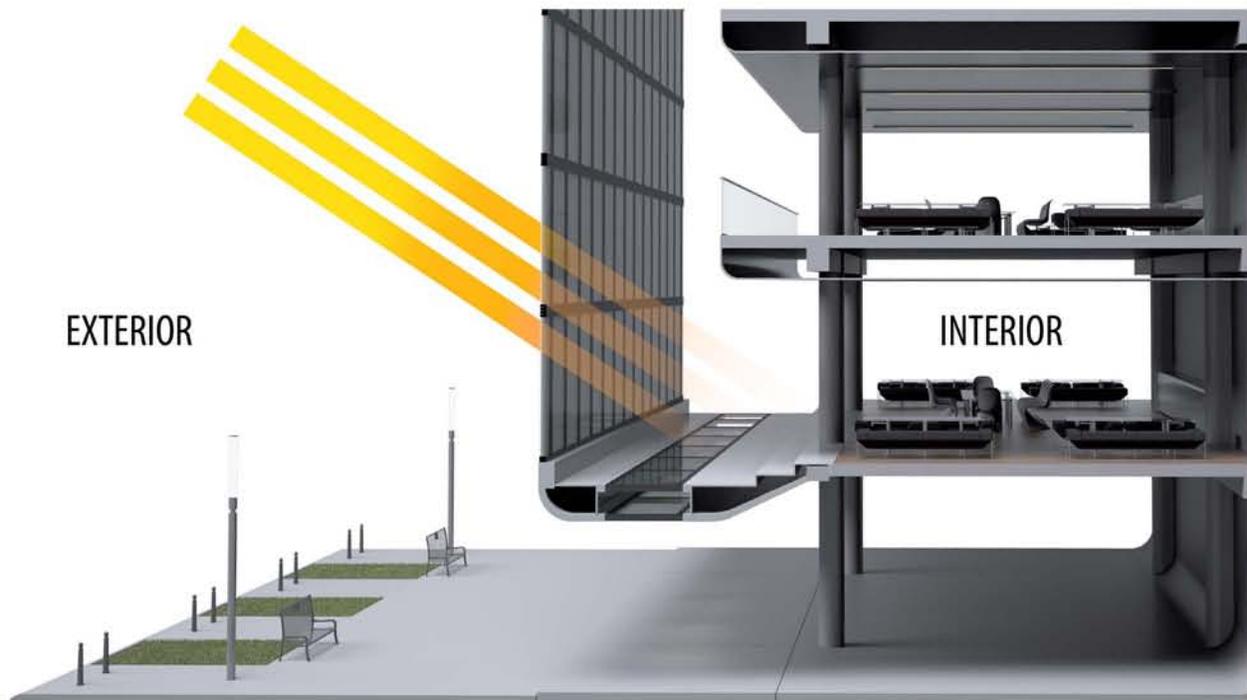


Figura 1. Coeficiente de sombreado

En la figura 1 se puede observar la dualidad de un espacio interior con un espacio exterior, mostrado en perspectiva seccionada, con la finalidad de representar la afectación del coeficiente de sombreado al interior de un edificio.

El coeficiente de sombreado es un parámetro para identificar la eficiencia de un sistema de protección solar. El valor del coeficiente de sombreado tiene un rango de 0 a 1. El valor de 1 significa que el sistema de protección solar es ineficiente, permitiendo el ingreso del 100% de la incidencia solar al interior del edificio. En contraste, si el valor del coeficiente de sombreado es 0.2, la efectividad del sistema de protección está permitiendo el ingreso de solamente el 20% de la incidencia de la radiación solar.

El coeficiente de ganancia de calor solar, conocido como *Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)*, entendido como la habilidad de resistencia de calor por medio de la radiación, convección y conducción de una envolvente, con la finalidad de tener un buen aislamiento térmico y protección ante la radiación solar. El rango del SHGC va de 0 a 1. El valor 1 significa que el sistema de protección es ineficiente para obstaculizar la radiación solar, permitiendo en su totalidad la radiación al interior del edificio de referencia. El valor de 0 significa que el sistema de protección ha alcanzado su función óptima, es decir no permite el ingreso de la radiación solar.



Figura 2. Coeficiente de ganancia de calor solar

En la figura 2 se puede observar la dualidad de un espacio interior con un espacio exterior, mostrado en perspectiva seccionada, con la finalidad de representar la afectación del coeficiente de ganancia de calor solar al interior de un edificio.

La transmitancia visible es la cantidad de ondas electromagnéticas en el rango visible que ingresa al edificio. El valor de transmitancia visible, conocido como *Visible Transmittance* (VT), es importante debido al gasto energético vinculado a una protección solar que no permite el paso de la radiación solar y en consecuencia tampoco la luz, con el inconveniente de tener que emplear energía eléctrica para activar el sistema de iluminación artificial del edificio. Sus rangos son semejantes a los coeficientes de sombreado y el coeficiente de ganancia de calor solar. El valor del coeficiente de transmitancia visible de 1 significa que se permite el 100% de la iluminación natural disponible y el valor de 0 equivale al ingreso del 0% de la iluminación natural disponible.

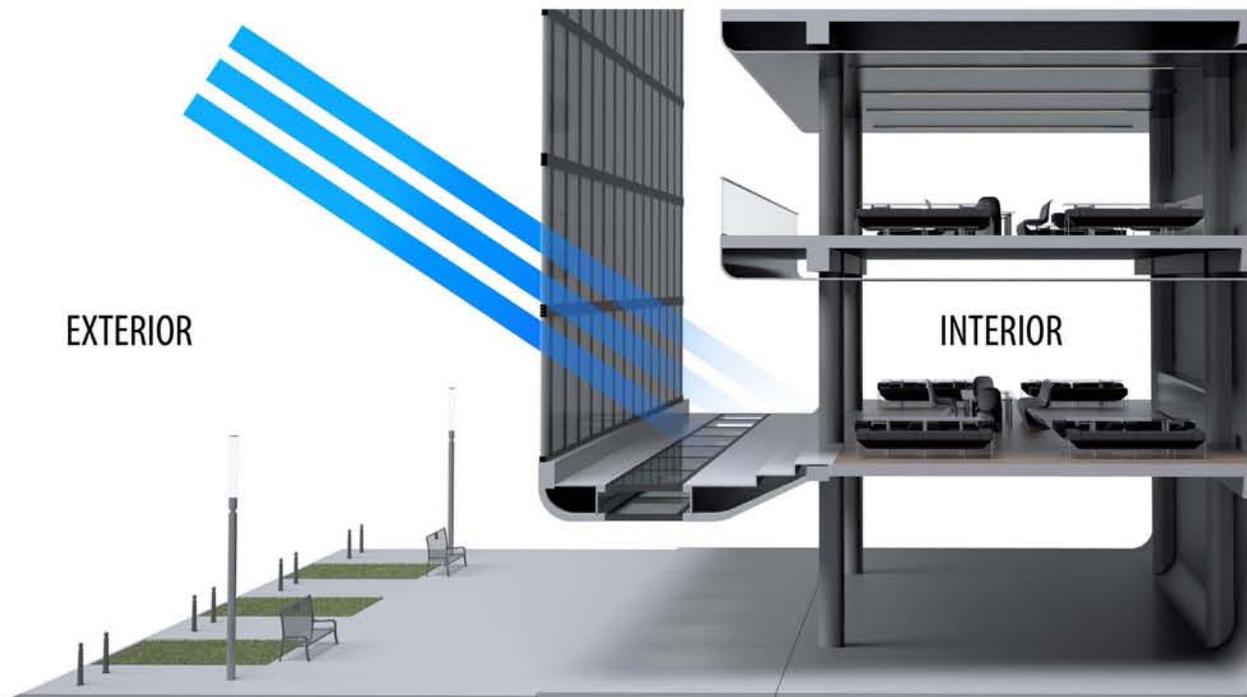


Figura 3. Transmitancia visible

En la figura 3 se representa un espacio interior en perspectiva seccionada en relación a uno exterior, con una envolvente restringiendo la transmitancia visible hacia el interior del edificio.

El valor-U está en relación a la transmisión térmica de los materiales. El valor-U esta predominantemente definido por los componentes opacos de la envolvente y su capacidad para restringir la transmisión térmica entre el exterior y el interior (Zemella y Faraguna, 2014, p. 2).

Es conveniente destacar que mediante la envolvente cinética se busca un equilibrio entre un sistema de protección de incidencia solar y otras variables, como lo son la calidad de iluminación natural al interior del edificio, confort térmico, cosecha de energía solar y la ventilación natural.

3.2

Intercambio selectivo

La envolvente arquitectónica tiene, debido a su disposición espacial en el edificio, la posibilidad de generar cambios principalmente mediante la dualidad de contextos y sus variables. La envolvente, en conjunción con las características de movimiento, también tiene la posibilidad de generar intercambios selectivos entre un contexto externo e interno. El contexto externo, entendido como el medio ambiente, tiene a su disposición una amplia gama de variables factibles de aprovecharse con finalidades específicas. El medio ambiente puede utilizarse como fuente de suministro de *inputs* en un sistema autónomo, ya sea híbrido o pasivo. La envolvente cinética, además, tiene la posibilidad de implementar estrategias de una permisibilidad selectiva de variables, introducidas al interior del edificio. Los cambios generados por las modificaciones de la envolvente cinética generan a su vez una amplia diversidad de modificaciones de las variables, de un estado inicial a un rango de manipulación por intervalos de tiempo.

La representación de una realidad física de variables específicas, requiere de datos, con la finalidad de llevar a cabo un procesamiento que a su vez conlleva a uno o varios *outputs* del sistema autónomo. Para realizar un buen monitoreo de variables específicas del medio ambiente, es necesario incorporar sensores como fuente de *inputs*. Una vez obtenido los datos necesarios para determinar rangos de eficiencia de la envolvente en relación a los *inputs*, se pueden generar acciones estratégicas apegadas a la bioclimática, para utilizar los cambios para uno o varios beneficios. Por tal motivo, el intercambio selectivo debe estar en estrecho vínculo con los intervalos adecuados de tiempo en constante modificación. Es decir, la búsqueda de una regularidad o equilibrio tiene como relación la comprensión de un diseño cinético como: un proceso de periodos constantes e inconstantes del medio ambiente.

En la publicación de "Teoría de la arquitectura" de Enrico Tedeschi (1969), se menciona la "permanencia y el cambio" (pp. 25-28). La permanencia como una condición de estado de desarrollo y de medio de comprensión de una realidad de transformación del espacio. El cambio como una necesidad imperante del ser humano, entendido como un ser creativo constantemente generando cambios y su vínculo con las modificaciones en el ámbito de lo artificial. Referencia: Tedeschi, E. (1969). *Teoría de la arquitectura*, 2da ed. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.

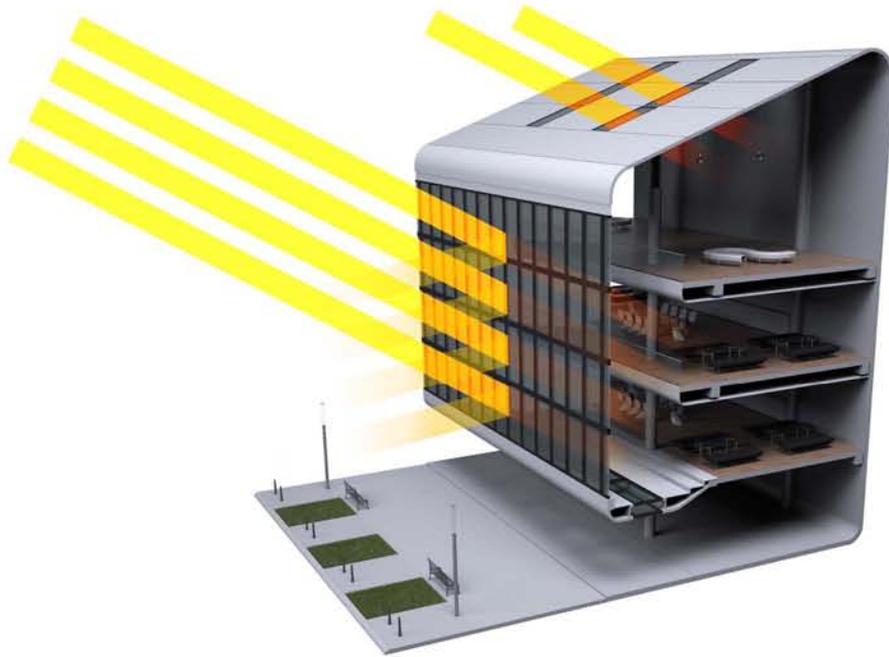


Figura 4. Filtro selectivo de la radiación solar

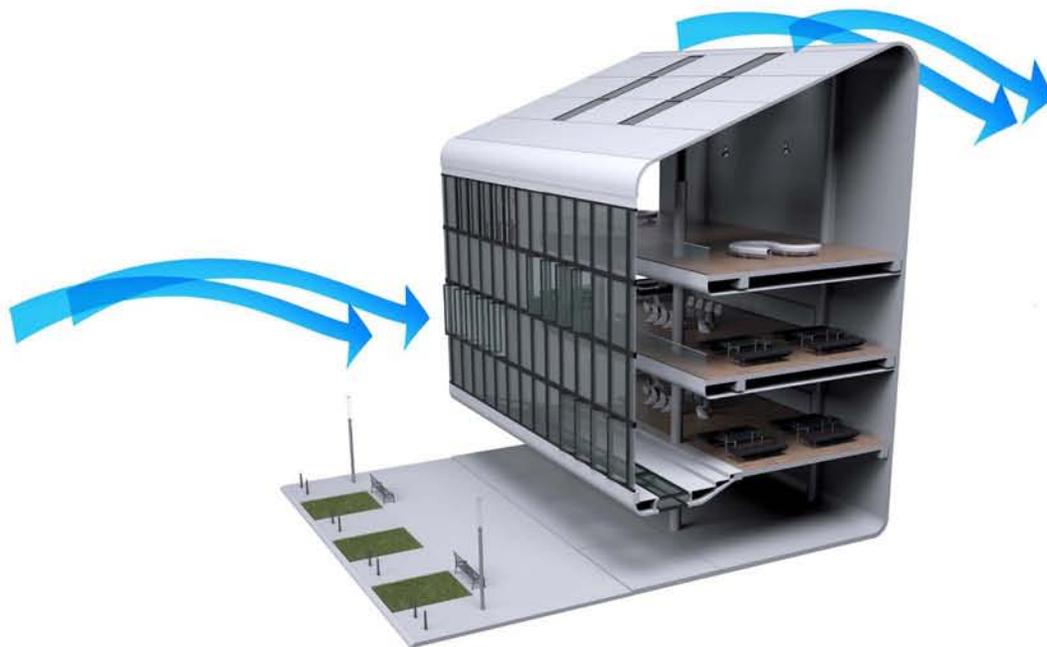


Figura 5. Filtro selectivo de la ventilación natural

En la figura 4, se muestra la posibilidad de utilizar la radiación solar, en un rango de filtro selectivo. En la figura 4 se observa la envolvente colocada de manera inclinada, vertical y horizontal, con la finalidad de demostrar las posibilidades de afectación en el interior del edificio. En la figura 5, se muestra la posibilidad de utilizar los flujos de ventilación natural, al igual que de las zonas de baja presión. En relación a las distintas necesidades que se requieran en determinados periodos durante el año, y en el transcurso del día.

3.2.1

Recurso potencial externo

El recurso externo, es decir, las variables del medio ambiente, pueden ser utilizados de manera semejante a vectores con distintas magnitudes, sentidos, direcciones y puntos de origen. Sin embargo, es necesario introducir la condicionante del tiempo, debido a los diversos fenómenos meteorológicos y las intervenciones humanas. Podemos considerar un recurso potencial externo desde la perspectiva de variables ajenas al funcionamiento de un sistema, con la posibilidad de utilizarse en los momentos necesarios. Consiguientemente, al incorporar diversos fenómenos meteorológicos y parámetros de confort humano, específicamente el confort térmico, en el funcionamiento de un sistema pasivo o híbrido, se hace uso de los recursos renovables como eje de activación.

Por lo tanto, el filtro de datos y las sub derivaciones de acciones, que a su vez modifican las condiciones iniciales, requieren de un monitoreo selectivo constante. Mediante la cuantificación constante de una representación del medio ambiente, se puede posteriormente generar parámetros de medición. Debido a la especificidad de las variables, es necesario seleccionar los sensores adecuados para cada variable. Eventualmente, en el futuro los materiales tendrán incorporados las capacidades sensoriales en relación a su disposición espacial, es decir, la capacidad de modificar sus características físicas y químicas acorde a un contexto específico.

3.2.2

Estrategias preventivas

Al considerar la envolvente arquitectónica como un intermediario entre dos contextos: externo (medio ambiente) e interno (interior del edificio), se puede optar por estrategias que mantengan una regularidad de condiciones específicas al interior del edificio. Las acciones derivadas de un modelo ideal de un estado de regulación constante, de estar vinculadas a los cambios del medio ambiente, se puede fomentar el uso racional basado en datos derivados en parámetros climáticos y de confort. La interacción del medio ambiente en conjunción con el modelo arquitectónico, han contribuido a la reformulación de las características de la arquitectura. A medida que los modelos arquitectónicos no estén en función de un estilo, en contraparte, estén en su función del contexto y el usuario, por consiguiente, podrán tener un enfoque flexible y adaptable al cambio.

3.2.3

Estrategias en conjuntos

Las estrategias en conjuntos es en cierta medida la generalización de las temáticas desarrolladas anteriormente, debido a que se pueden accionar estrategias individuales, en sub-conjuntos y conjuntos. Asimismo, si se toma en consideración la posibilidad de la transferencia de la información e intercambio, similar a los procesos informáticos que se realizan cotidianamente, se pueden considerar estrategias en conjuntos masivos. En la actualidad, los datos pueden ser incorporados al diseño. Las características de un diseño vinculado a las características del entorno, que al mismo tiempo fundamentan la existencia de las características diseñadas, son modelos con objetivos en común con otros objetos. Por lo tanto, el vínculo de objetivos, además de la flexibilidad para incorporar funciones ajenas, integra un componente más complejo, eventualmente, posteriormente integrando un sistema jerárquico de funciones.

Las estrategias en conjuntos, de llevarse a cabo en la envolvente arquitectónica, fortalecen el sentido cinético para ampliar la gama de las posibles funciones. Sin embargo, no es la exploración de un simple aumento de funciones a desplegar, en cambio es la exploración de un sistema capaz de incorporar alteraciones en relación a las necesidades cambiantes. La exploración de sistemas inteligentes, en paralelo al desarrollo de los materiales inteligentes, en un futuro el vínculo será cada vez más cohesivo, posibilitando la unión de componentes tangibles e intangibles con un enfoque de inteligencia artificial.

Referencias

Bahadori, M. N. y Dehghani-sanij, A. (2014). *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*. Nueva York: Springer.

Barnett, J., y Beasley, L. (2015). *Ecodesign for Cities and Suburbs*. Washington: Island Press.

Behling, S., Behling, St. y Schindler, B. (1996). *Sol Power: The Evolution of Solar Architecture*. Munich: Prestel.

Brooks, D. R., (2008). *Bringing the Sun Down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere*. Pennsylvania: Springer

Charles, K. E. (2003). *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada.

Editores de la Encyclopædia Britannica. (2016). *Wind*. Recuperado de: <https://www.britannica.com/science/wind> (Junio 23, 2017).

Gruber, P. (2011). Biomimetics in Architecture [Architekturbionik]. En Gruber, P., Bruckner, D., Hellmich, C., Schmiedmayer, H.-B., Stachelberger, H., y Gebeshuber, I. C. (Eds.), *Biomimetics – Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies* (pp. 127-148). Berlin: Springer.

Gueymard, C. A. y Myers, D. R. (2008). Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling. En Badescu, V. (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (pp. 1-27). Berlin: Springer.

Klein, G. A. (2010). *Industrial Color Physics*. Londres: Springer.

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. y Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind: Climate as an Architectural Instrument*. DOM Publishers.

Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Heidelberg: Springer.

Norton, B. (2014). *Harnessing Solar Heat*. Londres: Springer.

Oosterhuis, K. (2003). *Hyperbodies: Towards An E-motive Architecture*. Basel: Birkhäuser.

Paricio, I. (1999). *La protección solar*. Barcelona: Bisagra.

Peters, S. (2010). *Material Revolution: Sustainable and Multi-Purpose Materials for Design and Architecture*. Berlin: Birkhäuser.

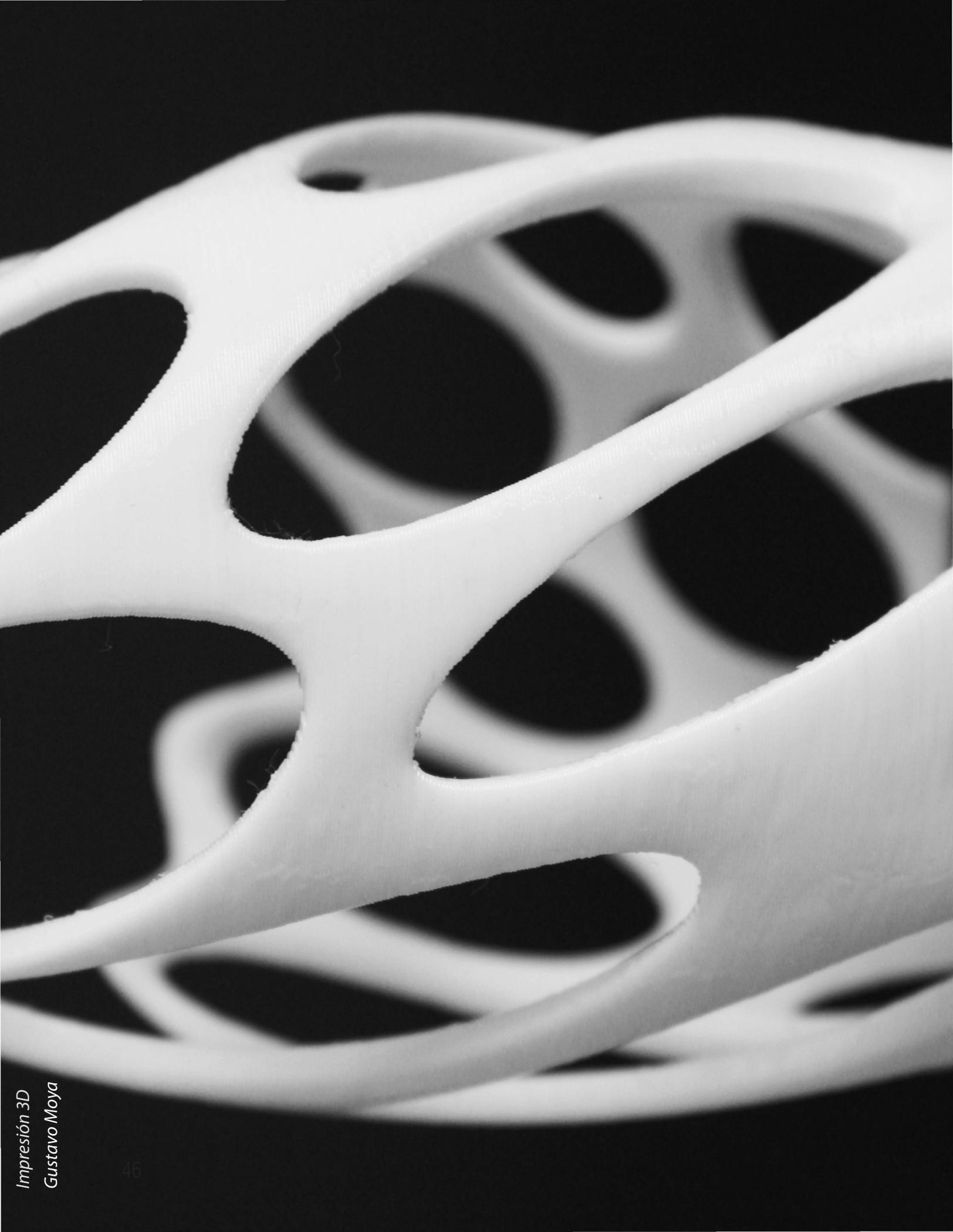
Ratti, C., y Claudel, M. (2014). The Rise of the "Invisible Detail": Ubiquitous Computing and the "Minimum Meaningful". *Architectural Design*, 84(4), 86-91. John Wiley & Sons, Ltd.

Tedeschi, E. (1969). *Teoría de la arquitectura*, 2da ed. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.

Vita-Finzi, C. (2008). *The Sun: A User's Manual*. Londres: Springer.

Zemella, G. y Faraguna, A. (2014). *Evolutionary Optimisation of Façade Design: A New Approach for the Design of Building Envelopes*. Londres: Springer.

Zirin, H. (2008). *Solar Radiation*. En Encyclopædia Britannica, inc. Recuperado de: <https://www.britannica.com/topic/solar-radiation> (Junio 23, 2017).



Implementación de materiales emergentes

El material es clave en la exploración de nuevos prototipos de envolventes arquitectónicas, aunado a la importancia de los procesos y herramientas de manipulación. Asimismo, los avances de las últimas décadas respecto a los materiales capaces de reaccionar ante determinados estímulos, amplían la diversidad de soluciones tecnológicas en la aplicación arquitectónica.

La falta de principios de adaptabilidad de los edificios por sus características estáticas, en contraste con las propiedades y características de los seres vivos, que pueden cambiar sus procesos, estructura, composición, entre otras características para mejorar su eficiencia en un contexto variable, hacen de la envolvente un parámetro potencial para la investigación de nuevas soluciones en conjunto con los avances de las características y propiedades de materiales innovadores. La “adaptación puede ser encontrada en múltiples escalas físicas y tiempos de resolución” (Loonen, 2015, p. 117). Una de las opciones para optimizar las cualidades de los edificios es la posibilidad de utilizar los cambios del medio ambiente, integrando las cualidades de los sistemas híbridos y pasivos en la envolvente de los edificios.

La aplicación de materiales en la envolvente de los edificios, en un inicio recurría a la utilización de materiales regionales o locales para la manufactura, sin embargo, en general durante el movimiento moderno la homogeneidad de técnicas y materiales a su vez homogeneizaron la diversidad de las formas arquitectónicas. Sin embargo, las necesidades y condicionantes del solar son en cada situación y contexto distintas. En las últimas décadas el avance de los materiales con características multifuncionales y los diversos métodos para manipular su relación espacial, así como, el continuo desarrollo del procesamiento y transmisión de datos, aunado a la factibilidad de crear composiciones complejas por medio de la fabricación digital: son factores que han contribuido en la exploración de nuevas posibilidades para la aplicación arquitectónica.

4.1 Aerogel

El aerogel tiene sus inicios en el trabajo de Kistler en 1932, en el cual se reemplazó el líquido por gas en la estructura de redes interconectadas del gel (Kistler, 1932). Mediante la aplicación de nuevas técnicas de secado del gel, utilizando los parámetros de temperatura crítica y presión del líquido para mantener la estructura porosa del aerogel, se pudo crear una red interconectada estable (Pierre, 2011, pp. 3-12). Por lo general el volumen de porosidad es del 90% en aerogeles de sílice (Brinker y Scherer, 1990. p. 523). Llegando hasta una estructura porosa del 99.8% por volumen, y con una densidad de 3kg m^3 con métodos posteriores (Tillotson y Hrubesh, 1992).

Los aerogeles SiO_2 (aerogel de sílice) son uno de los más estudiados, aunado a la factibilidad de producción y sus numerosas ventajas de aplicación. El proceso de obtención del aerogel SiO_2 consiste en tres fases generales, de las cuales se describen a continuación:

La fase de Sol-Gel Synthesis consiste en una reacción formada en un médium líquido, formando una red solida nano-estructurada. El proceso de cambio de líquido a solido es conocido como la transición de sol-gel. (Pierre y Rigacci, 2011, p. 21).

La fase de envejecimiento es utilizado antes del secado del gel con la finalidad de reforzar la nano estructura formada en la fase de sol-gel (Pierre y Rigacci, 2011, p. 24).

La última fase, el secado, se tienen en general tres opciones:

1. "Freeze-drying.
2. Evaporación.
3. Secado supercrítico" (Pierre y Rigacci, 2011, p. 25).

Respecto a posibles aplicaciones del aerogel como componentes de la envolvente, se han realizado avances en la creación de piezas monolíticas de aerogel con características translucidas en los proyectos por European JOULE II y III, asimismo, por los proyectos de Francia PACTE

(Pajonk, 2003). También, se han realizado paneles transparentes de cristal por la compañía Suiza Airglass Ltd. como parte del programa europeo EUROSOL (Pajonk, 2003).

Asimismo, las características del *aerogel silica* han sido estudiadas por sus excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico. La conductividad térmica del aerogel de sílice es de $0.015 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a temperatura ambiente, además, de no ser inflamables (Pierre y Rigacci, 2011, p. 34). El aerogel ha sido empleado en las exploraciones espaciales por la NASA (Tsou, 1995). La NASA utilizó el aerogel en la misión espacial *Stardust* para capturar partículas, sin dañarlas en el momento del impacto. Asimismo, ha sido utilizado como un componente de la fachada *OKAGEL* de la estación Halley VI proyectada para la nueva estación de investigación británica en el antártico (Schneider, 2011, p. 886).

Se adquirieron tres materiales de aerogel ofrecidos en BuyAerogel.com™ como parte del material a implementar en la envolvente cinética. Los materiales adquiridos fueron utilizados con fines académicos. Los tres materiales adquiridos, mencionados anteriormente, son los siguientes:

1. Airloy® X56 Strong Transparent Aerogel Disc. Airloy® es de la marca registrada de Aerogel Technologies, LLC.
2. Airloy® X116 Non-Flammable Strong Aerogel Tile. Airloy® es de la marca registrada de Aerogel Technologies, LLC.
3. Thermal Wrap™ 6-mm Blanket. Thermal Wrap™ es de la marca registrada de Cabot Corporation.

Nota: Las patentes, así como información adicional, de cada uno de los materiales pueden ser consultados en BuyAerogel.com™.

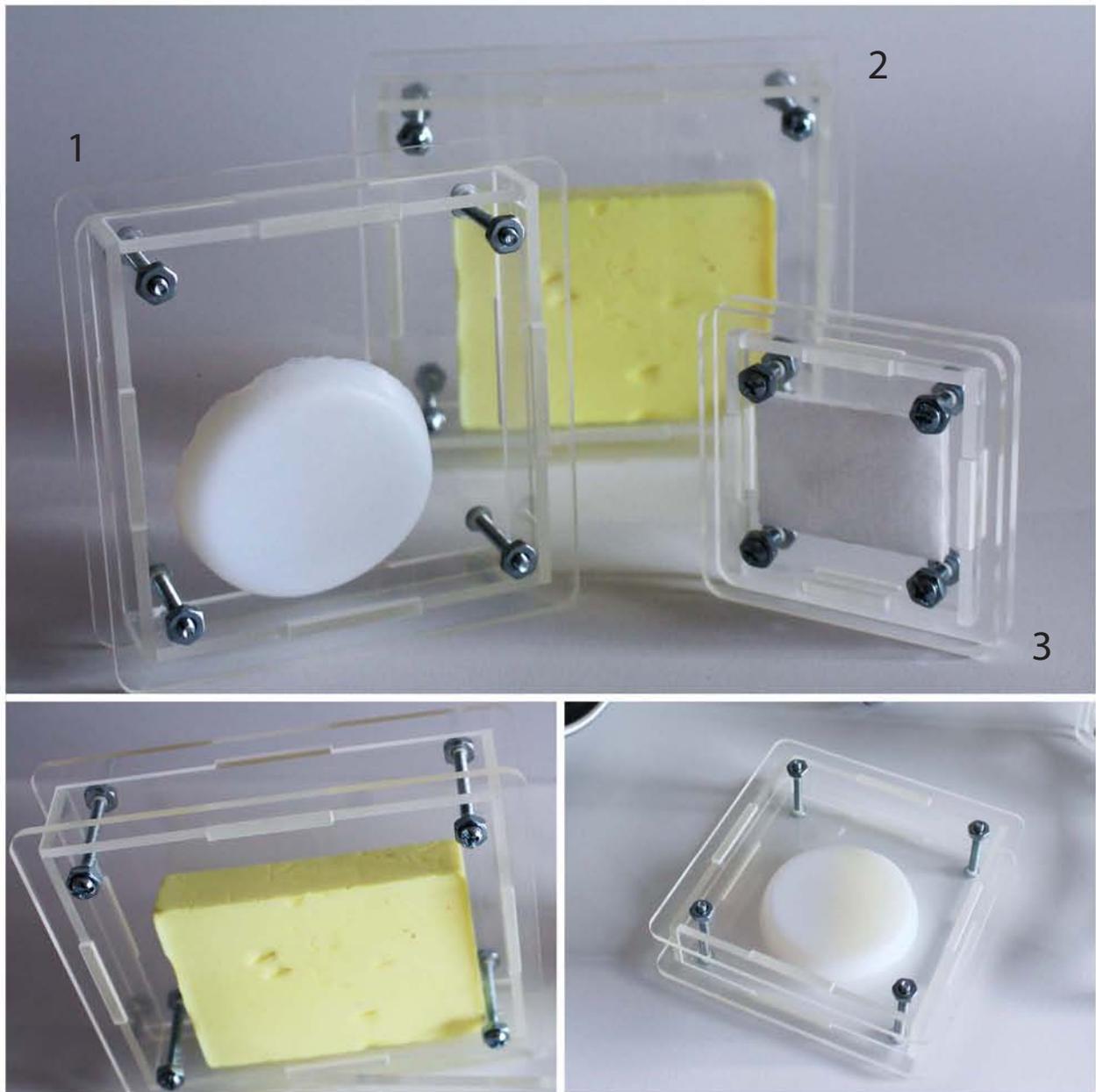


Figura 6. Aerogel

Utilizando los tres materiales de aerogel, mencionados anteriormente, se realizó una prueba de desempeño térmico. Para el experimento se empleó una fuente de calor de luz infrarroja de 100 Watts, un sensor de temperatura (TMP006 de SparkFun[®] electronics) empleando una termopila, y Arduino[®] - IDE. Los resultados del experimento se muestran a continuación:

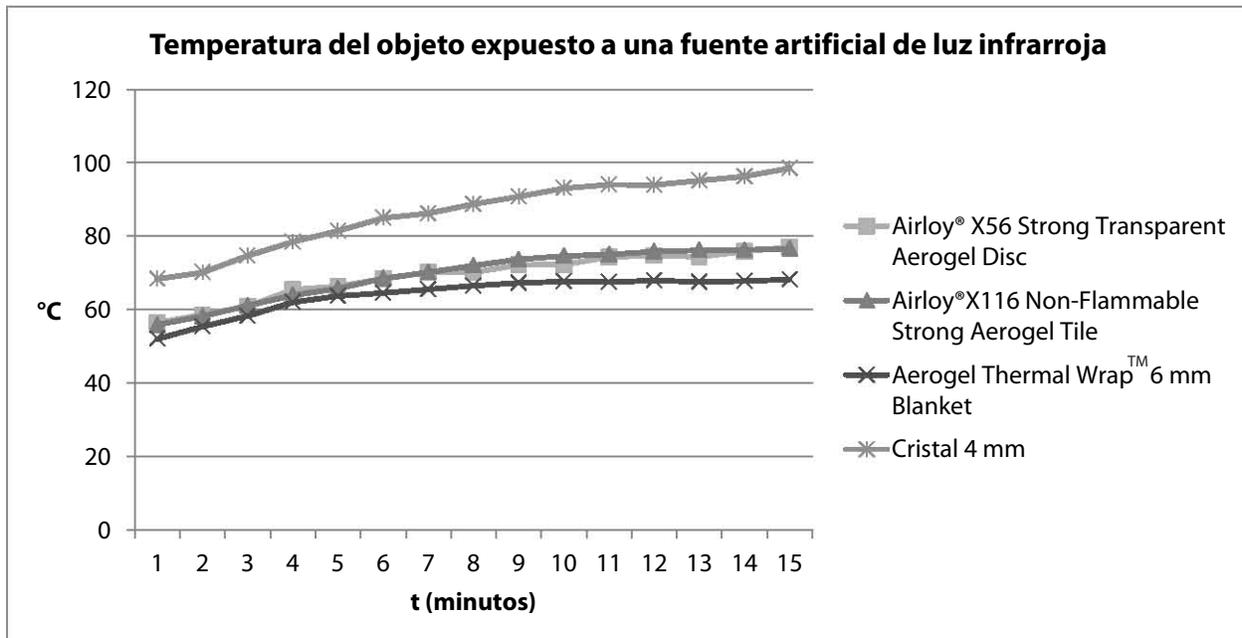


Figura 7. Comparación de temperatura de los objetos de aerogel

Se puede observar la diferencia entre las propiedades de aislamiento térmico del aerogel y un cristal de 4 mm de espesor. La temperatura del objeto fue medido en la superficie posterior del objeto, es decir, la cara no expuesta a la luz infrarroja de 100 W. De los materiales de aerogel, se puede observar un mejor desempeño térmico del Aerogel Thermal Wrap™ de 6 mm de espesor. Además de las favorables características de desempeño térmico, también se puede destacar las buenas características de aislamiento acústico. Asimismo, los avances del aerogel Airloy® para mejorar significativamente la resistencia del aerogel y subsecuentemente las derivadas aplicaciones.

4.2

Polímeros con memoria de forma y electroactivos

Los polímeros son uno de los materiales que incorporan en mayor medida aspectos claves de manipulación de variables mediante estímulos específicos, además de la posibilidad de combinar dos o varios polímeros en un componente multifuncional o multi-reactivo.

“Los polímeros ofrecen grandes ventajas en el desarrollo de nuevos productos, utilizando menos materia, sistemas integrantes de funciones, configuración de propiedades y características, en consecuencia el uso de polímeros tiene un gran potencial para futuros diseños. Los polímeros activos con características similares a los músculos biológicos tienen grandes prospectivos para el desarrollo de la biomimética. Estos polímeros tienen características similares a los músculos biológicos como la resiliencia, larga actuación y tolerancia de daños, son más flexibles que los motores convencionales y pueden actuar como *dampers* de vibración e impacto; los polímeros además son similares en la apariencia estética” (Samatham et al., p. 1., citó a Bar-Cohen, 2003).

En consecuencia al utilizar polímeros activos para el desarrollo de una envolvente, se pueden evaluar nuevas posibilidades de accionamiento y regulación de variables, por medio de criterios de eficiencia de regulación en los edificios. A su vez, utilizando datos estadísticos y datos directos por medio de hardware y software especializado, al igual que sensores, para el procesamiento de información y deliberación del cambio de las características de la envolvente cinética por intervalos de tiempo.

“Los materiales activos pueden convertir energía eléctrica o química directamente en energía mecánica a través de la respuesta del material” (Samatham et al., p. 2., citó a Courty, Mine, Tajbakhsh y Terentjev, 2003).

Dependiendo del tipo de estímulo y configuración o rango de movilidad del polímero se pueden categorizar en activos o pasivos, asimismo, en deformables por la electricidad y no deformables por medios eléctricos. Sin embargo, también se pueden agrupar por la dimensión de la función, entre otras variables a considerar.

“Hay muchos tipos de polímeros activos con diferentes propiedades controlables debido a la variedad de estímulos pueden producir respuestas reversibles o permanentes; pueden ser activos o pasivos por incorporación en los polímeros, haciendo estructuras inteligentes” (Samatham et al., p. 2., citó a Bar-Cohen, 2001).

“Dependiendo del tipo de actuación, los materiales usados son clasificados en general como polímeros no deformables por la electricidad (actuando por estímulos no eléctricos como pH, luz, temperatura, etc.) y polímeros electro activos (EAP's) (accionados por inputs eléctricos)” (Samatham et al., p. 3., citó a Bar-Cohen, 2001).

Los polímeros electro activos han sido utilizados en mayor medida en aplicaciones médicas, robóticas y aeroespaciales, en la actualidad la exploración de las distintas modalidades de movimientos y las fuentes de estímulos necesarios para su reacción, son objeto de estudio para la aplicación multidisciplinar, debido a la complejidad de los movimientos y configuraciones de los polímeros.

A diferencia de los polímeros electro-activos, los polímeros con memoria de forma, activados por diferenciales de temperatura pre configurados en el polímero, son otro rango de posibilidades en la aplicación como recurso primordialmente pasivo en la envolvente arquitectónica. A continuación se describe el proceso de aplicación de las etapas de “memoria” del polímero para reaccionar a temperaturas de referencia molecular y la recuperación de su fase de cambio a la permanente:

“Los materiales con memoria de forma son materiales de estímulo-respuesta que cambian la forma a través de la aplicación de un estímulo externo. La inducción-térmica del efecto memoria-forma es usada ampliamente. Los polímeros de memoria de forma de respuesta térmica cambian de forma cuando son calentados por encima de cierta temperatura y pueden ser procesados en dos formas. Una forma, la forma permanente, es obtenida a través de procesos de técnicas convencionales como la extrusión y moldes de inyección.

Durante este proceso, el material es calentado por encima de la transición térmica (T_{perm}). La fase por encima de T_{perm} forma cadenas físicas cruzadas que permiten a los polímeros formar formas permanentes. La segunda fase ajusta la fase temporal, actuando como un switch molecular... Cuando el material es calentado por encima del T_{trans} , las cadenas físicas cruzadas en la fase de cambio son destrozadas, forzando al material en una forma permanente conocida como recuperación” (Samatham et al., pp. 5-6., citó a Lendlein y Kelch, 2002).

Los Polímeros con Memoria de Forma (*Shape Memory Polymers, SMP*), tienen la capacidad de responder ante cierto estímulo dependiendo de la estructura molecular. Asimismo, de recuperar su forma original una vez eliminado o disminuido el estímulo, con distintos tiempos de recuperación, incluso es posible configurar múltiples posiciones, en relación a movimientos bidireccionales y tridimensionales. “La habilidad de los polímeros para responder a estímulos externos es de gran significado científico y tecnológico” (Behl, Zotzmann y Lendlein, 2010, p. 1).

Las variables que una envolvente puede controlar, deben en su fase inicial de desarrollo progresar con el aumento de los mismos, considerando que el incremento o decremento de una variable puede a su vez aumentar o disminuir otras, como consecuencia el material por si solo necesita del control y subdivisiones de control, ya sea centralizado o descentralizado, si se requiere de manipular varias condiciones del medio ambiente. Asimismo, se puede optar por el control subdividido incorporando un *cluster* de elementos de accionamiento ante diferentes estímulos, es decir, la composición de diferentes elementos ejecutables por medio de las variables a reaccionar, no confiriéndole la capacidad a un solo elemento. En cambio, diversificar

las funciones por variables a controlar, evaluando a la vez la escalabilidad del prototipo en relación a su función.

La transición de un material con memoria o configuración de un estado manipulable de la forma a un material con cualidades inteligentes de cambio de forma, será un recurso tecnológico que potenciará las capacidades del diseño arquitectónico y la conexión con los usuarios.



Figura 8. Materiales emergentes

En la figura 8 se muestra la adquisición de un Polimero con Memoria de Forma de Veritex™, CRG Industries, LLC. Asimismo, la adquisición de Aleación con Memoria de Forma de Flexinol®. El Polimero con Memoria de Forma y la Aleación con Memoria de Forma, mencionados anteriormente, fueron utilizados de manera conceptual. Se consideran los parametros de movimiento y capacidad de reacción de los materiales para ejecutar los movimientos específicos ilustrados en el capítulo V, en relación al desarrollo experimental del prototipo seleccionado. Asimismo, considerando el desarrollo de los materiales emergentes, la capacidad de producción y los nuevos rangos de accionamiento: potencializan las diversas aplicaciones arquitectónicas. Aunado a la reducción de los componentes necesarios para integrar un sistema cinético.



Figura 9. Impresión 3D

Posiblemente, en las décadas posteriores los materiales tendrán aun una mayor capacidad de funcionar como sistemas inteligentes. Posibilitando un diseño avanzado “intangible” en mayor proporción, es decir, la reducción al mínimo de la materia necesaria para cumplir con determinadas funciones. Aunado, a la amplia gama de posibilidades para utilizar una superficie u objeto de múltiples formas y con diversos vínculos tangibles e intangibles.

Referencias

Bar-Cohen, Y. (2003). Actuation of biologically inspired intelligent robotics using artificial muscles. *Industrial Robot: An International Journal*, 30(4), 331–337. doi:10.1108/01439910310479702

Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2001). *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. Washington: SPIE Press.

Behl, M., Zotzmann, J., y Lendlein, A. (2010). Shape-Memory Polymers and Shape-Changing Polymers. En Lendlein, A. (Ed.), *Shape-Memory Polymers* (pp. 1-40). Berlin: Springer.

Brinker, C. J., y Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Londres: Academic Press.

Courty, S., Mine, J., Tajbakhsh, A. R., y Terentjev, E. M. (2003). Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: new electromechanical actuators. *EPL (Europhysics Letters)*, 64(5), 654.

Kistler, S. S. (1931). Coherent Expanded-Aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, 36, (1), 52-64. doi: 10.1021/j150331a003

Lendlein, A., y Kelch, S. (2002). Shape-Memory Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 41, 2034–2057. doi:10.1002/1521-3773(20020617)41:12 <2034::AID-ANIE2034>3.0.CO;2-M

Loonen, R. C. G. M. (2015). Bio-inspired Adaptive Building Skins. En Torgal, F. P., Labrincha, J. A., Diamanti, M. V., Yu, C.-P., y Lee, H. K. (Eds.), *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering* (pp. 115-134). Londres: Springer.

Pajonk, G. M. (2003). Some Applications of Silica Aerogels. *Colloid and Polymer Science*, 281, 637–651. doi: 10.1007/s00396-002-0814-9

Pierre, A. C. (2011). History of Aerogels. En Aegerter, M. A., y Prassas, M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 3-18). Londres: Springer.

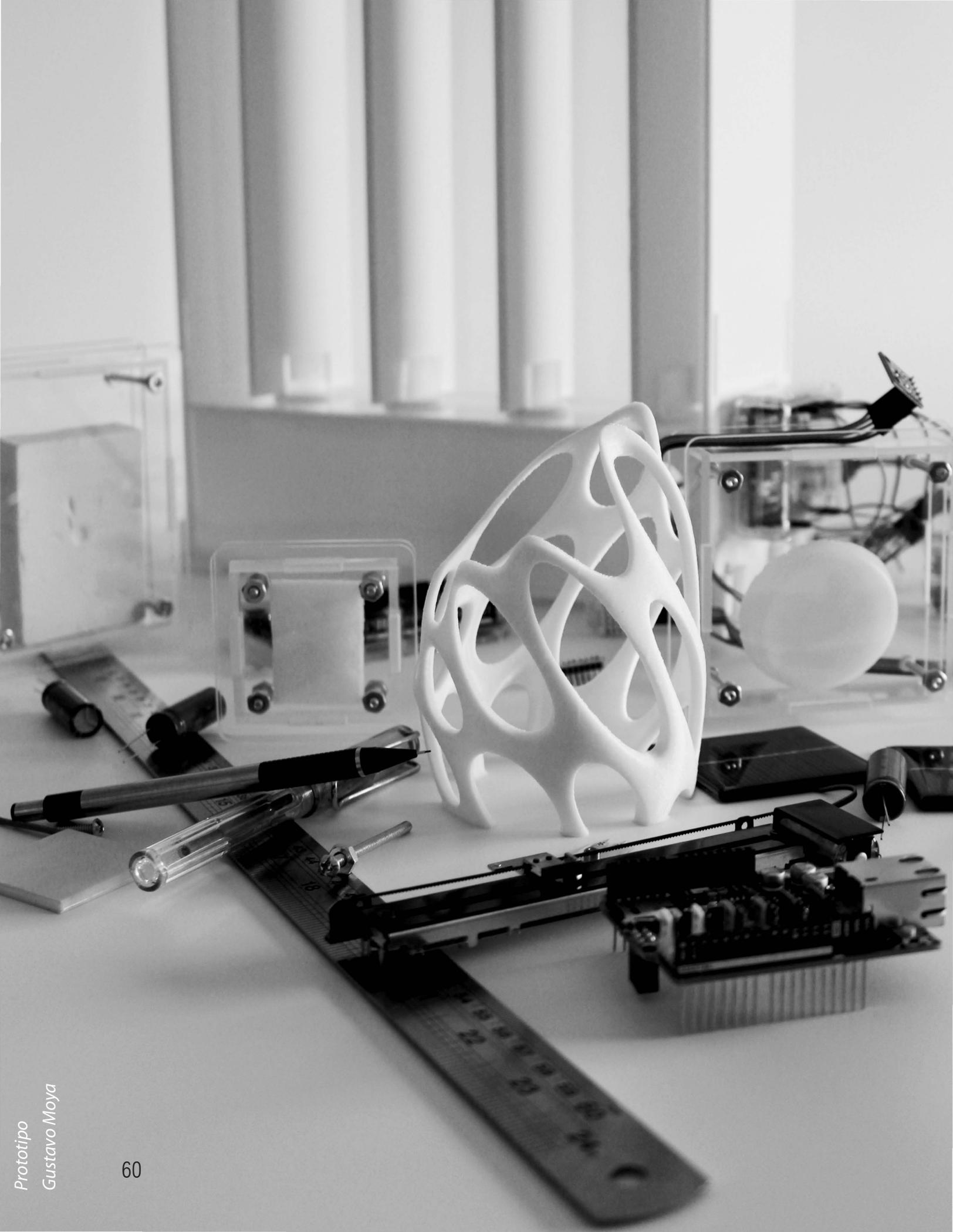
Pierre, A. C., y Rigacci, A. (2011). SiO₂ Aerogels. En Aegerter, M. A., y Prassas, M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 21-45). Londres: Springer.

Samatham, R., Kim, K. J., Dogruer, D., Choi, H.R., Konyo, M., Madden, J.D., Nakabo, Y., Nam, J.-D., Su, J., Tadokoro, S., Yim, W., y Yamakita, M. (2007). Active Polymers: An Overview. En Kim, K. J., y Tadokoro, S. (Eds.), *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors* (pp. 1-36). Londres: Springer.

Schneider, F. (2011). OKAGEL: High Insulating Day Lighting Systems. En Aegerter, M. A., Leventis, N., y Koebel, M. M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 879-888). Londres: Springer.

Tillotson, T. M., y Hrubesh, L. W. (1992). Transparent ultralow-density silica aerogels prepared by a two-step sol-gel process. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, 44-50. doi: 10.1016/S0022-3093(05)80427-2

Tsou, P. (1995). Silica aerogel captures cosmic dust intact. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 415-427.



Prototipo de envolvente cinética



La envolvente cinética, debido a la disposición espacial en el edificio, es un componente que le brinda un fuerte sentido de identidad y gama de funciones en relación al espacio de emplazamiento. La envolvente arquitectónica, en conjunto con las características de movilidad, son un recurso tecnológico aprovechable en distintos niveles de funcionamiento. El sistema de envolvente cinética se puede subdividir, primordialmente en tres conjuntos generales, un ciclo de retroalimentación y la fuente de suministro energético autónomo: el primer conjunto son los *inputs*, el segundo conjunto es el procesamiento, y el tercer conjunto son los *outputs* obtenidos. Aunado al ciclo de retroalimentación del sistema para determinar la eficiencia de cada subconjunto. Asimismo, la incorporación de la fuente de suministro energético por medios autónomos, ya sea incorporando la cosecha de energía en la envolvente o de manera adyacente en otra ubicación del edificio, primordialmente definido por las condiciones específicas de cada contexto.

A continuación se describe el desarrollo de una envolvente cinética, en modalidad de prototipo. En primera instancia se describen algunas de las ideas iniciales de envolvente cinética, posteriormente se describe el desarrollo del prototipo de envolvente cinética seleccionado. El prototipo de envolvente cinética fue desarrollado en 3D y en físico, con la finalidad de evaluar la eficiencia del mismo. Asimismo, se describen los procesos, herramientas, materiales y otras características de la envolvente cinética propuesta.

5.1

Desarrollo de ideas iniciales

Es conveniente describir las ideas iniciales y los desarrollos parciales de algunas de ellas, debido a que mediante el desarrollo de cada uno se pudo obtener rasgos conceptuales para obtener el prototipo final de envolvente cinética. También, es importante considerar que la utilidad del desarrollo de los prototipos no son solamente el punto de origen y la conclusión del prototipo, en cambio, el *proceso* del punto "A" al "B" son una fuente de retroalimentación de aspectos cualitativos y cuantitativos. Igualmente, la experimentación con distintas herramientas, procesos, materiales, algoritmos, entre otros componentes de un sistema: son recursos tecnológicos catalizadores de nuevas ideas en el diseño arquitectónico.

A continuación se describe un prototipo de un seguidor solar, con la finalidad de identificar los vectores de incidencia solar y un parámetro de medición de luz medida mediante cuatro fotorresistencias. El seguidor solar tiene un servo en el plano horizontal y uno en el plano vertical, para determinar el azimut y la altitud del Sol. Asimismo, se utilizó el microcontrolador Arduino® Uno-R3 SMD y Arduino® software IDE (*Integrated Development Environment*) para controlar los servos en relación a los parámetros obtenidos de las cuatro fotorresistencias. Mediante el seguidor solar desarrollado se pudo obtener un parámetro de *input* interconectado con un procesamiento de datos y la derivación en un *output* o respuesta de movimiento, ejecutada mediante un servo. El seguidor solar mostrado a continuación fue desarrollado a nivel de prototipo, con piezas de acrílico cortadas con láser.

Potencialmente, se puede cambiar la función del prototipo de seguidor solar para brindar protección mediante la incorporación de una superficie en la extremidad del seguidor solar. Es decir, el cambio de modalidad de identificar el vector hacia la posibilidad de brindar protección ajustando una superficie que intervenga con la incidencia solar, utilizando la capacidad del seguidor solar para desplazarse en el eje horizontal y vertical.

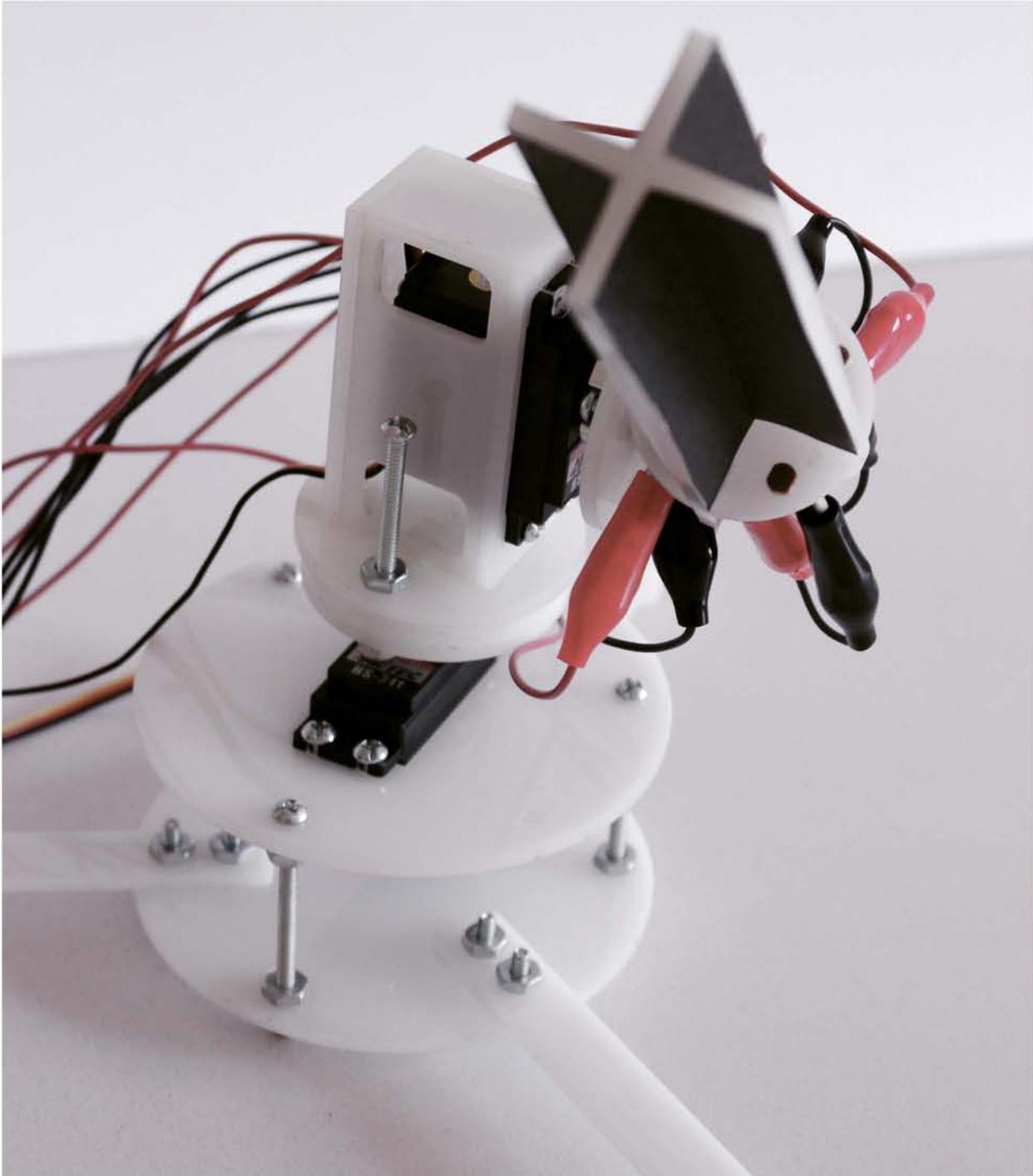


Figura 10. Prototipo de seguidor solar

Es pertinente considerar las limitaciones del seguidor solar, debido a las capacidades limitadas de medición del espectro visible de la luz de las cuatro fotorresistencias incorporadas. El prototipo fue, primordialmente utilizado, para experimentar con las características de movilidad de los servos en relación a una fuente de *input* variable y algunos algoritmos. Las piezas fueron diseñadas en Autodesk® AutoCAD® software y SOLIDWORKS® 3D CAD software.

En relación a la figura 10, prototipo de seguidor solar, es una alternativa generada para monitorear los vectores de incidencia solar. Aunado al prototipo de seguidor solar desarrollado, se pueden utilizar otras fuentes de referencia como lo puede ser la geometría solar generada en Dynamo. La geometría solar generada en Revit® con el *add-in* Dynamo puede ser utilizado para determinar las características, propiedades y la forma de la superficie, para obtener determinadas condiciones al interior del edificio y la correlación con las condiciones óptimas para los usuarios. A continuación se muestran algunos vectores de incidencia solar realizados mediante Revit® con el *add-in* Dynamo:

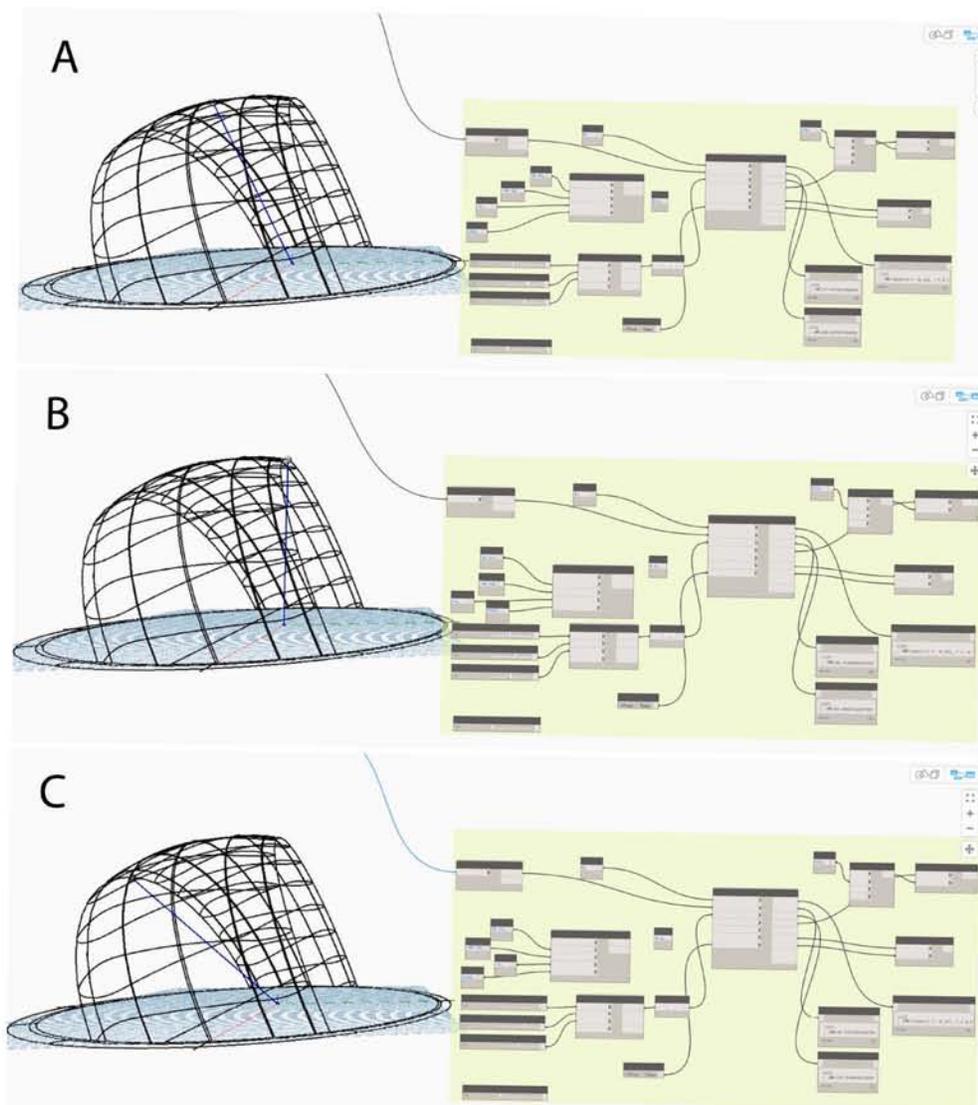


Figura 11. Geometría solar para la ubicación de la Ciudad de México. El bloque A representa el vector de incidencia solar del equinoccio de marzo y septiembre; el bloque B representa el vector de incidencia solar del solsticio de junio; por último, el bloque C representa el vector de incidencia solar del solsticio de diciembre.

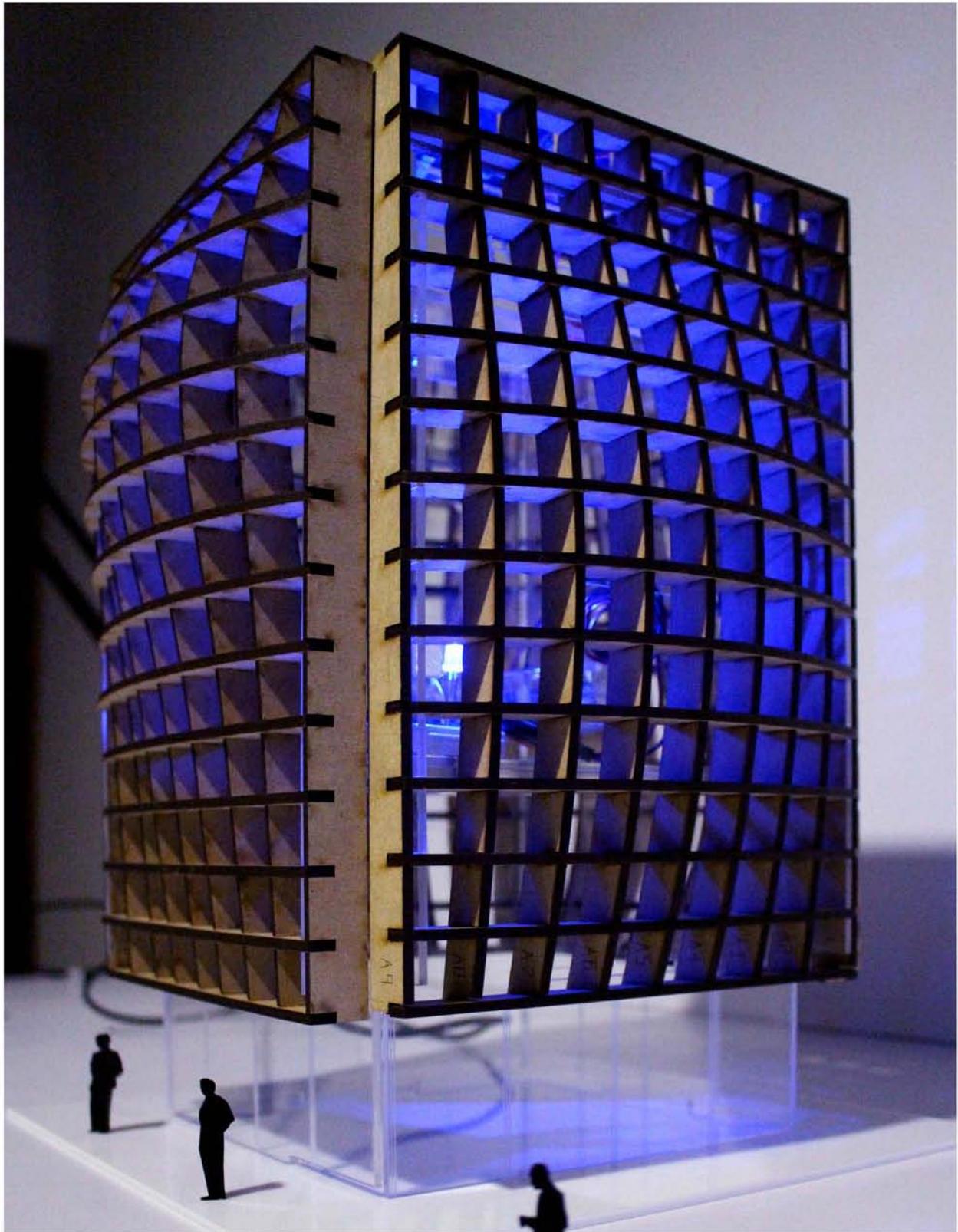


Figura 12. Maqueta conceptual

El modelo conceptual está realizado mediante piezas longitudinales y transversales con uniones en sus intersecciones. Las piezas son de MDF cortadas en láser. Las piezas fueron diseñadas en Rhinoceros® 5.0 software y Autodesk® AutoCAD® software.

El modelo conceptual desarrollado, figuras 12 y 13, está compuesto por secciones longitudinales y transversales, unidas mediante las intersecciones. Las superficies fueron generadas mediante una red de curvas, de las cuales se derivan las secciones antes mencionadas, obtenidas mediante la proyección de líneas en los planos X, Y y Z. Las formas de las superficies fueron diseñadas para generar espacios con capacidades de movimiento en relación a la geometría solar. A manera de concepto, desarrollado en el modelo conceptual, la envolvente podría generar modificaciones de la forma en relación a la posición del Sol. Cada intersección de la red de secciones transversales y longitudinales, pueden cambiar su referencia espacial, posiblemente mediante actuadores lineales. Asimismo, se incorporaron paneles fotovoltaicos en la azotea, para operar de manera autónoma.

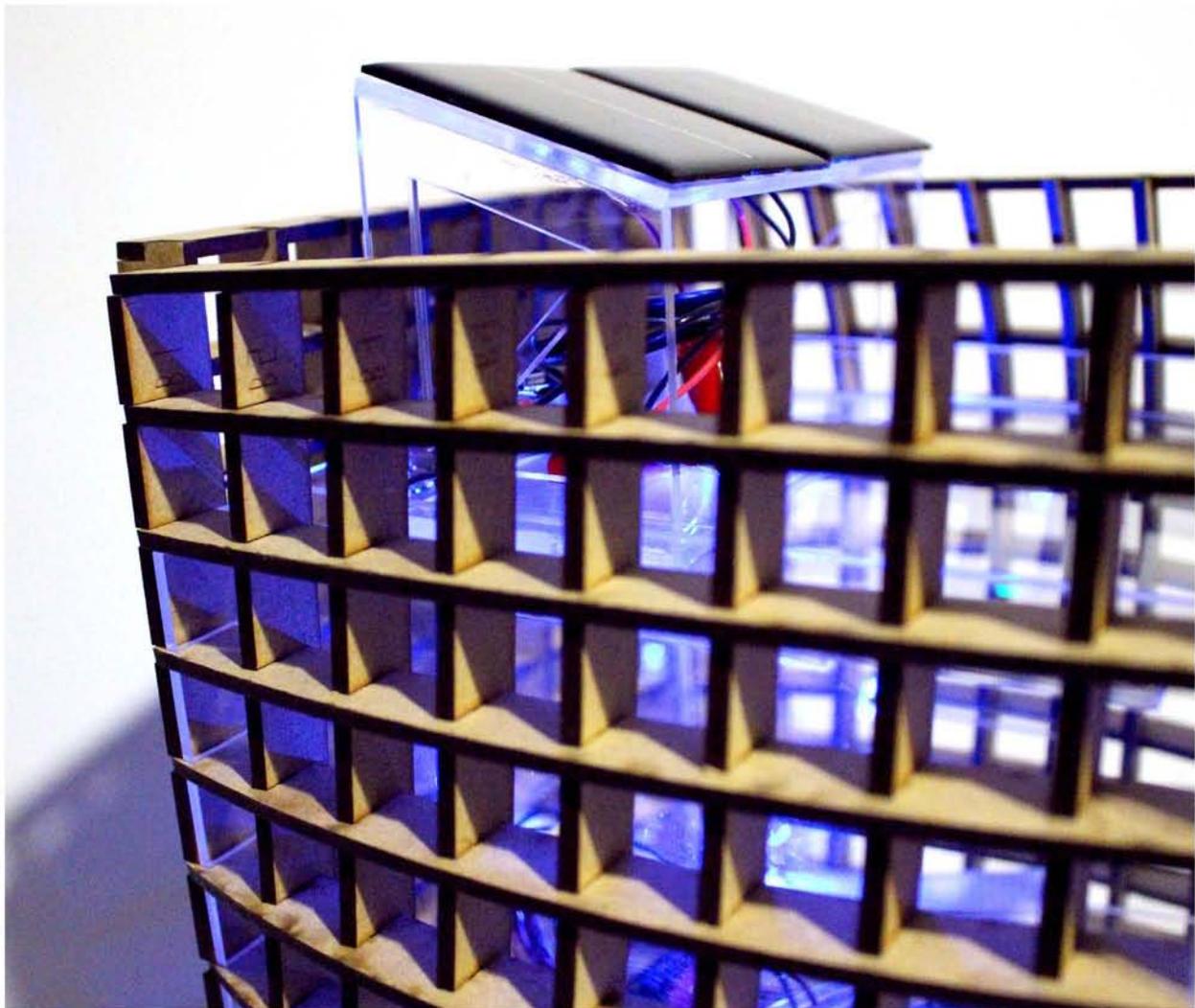


Figura 13. Configuración de la geometría-contexto

En el siguiente prototipo, figuras 14 y 15, se exploró el concepto de permisibilidad selectiva, es decir, la regulación mediante diferentes parámetros de abertura de orificios y la superposición de las capas. Se utilizó un acrílico de color naranja para acentuar los posibles cambios generados por las características y la posición espacial de las capas externas de acrílico blanco. Las capas de la envolvente tienen un movimiento lineal, activado mediante un sensor de distancia (*input*) y un servo Hitec HS-422 (*output*). El procesamiento de los datos se realizó mediante Arduino® Uno e IDE. Se utilizó un sensor de distancia, para poder interactuar con el prototipo de manera inmediata, posibilitando la observación de los cambios externos y su relación con la generación de distintos ambientes arquitectónicos.

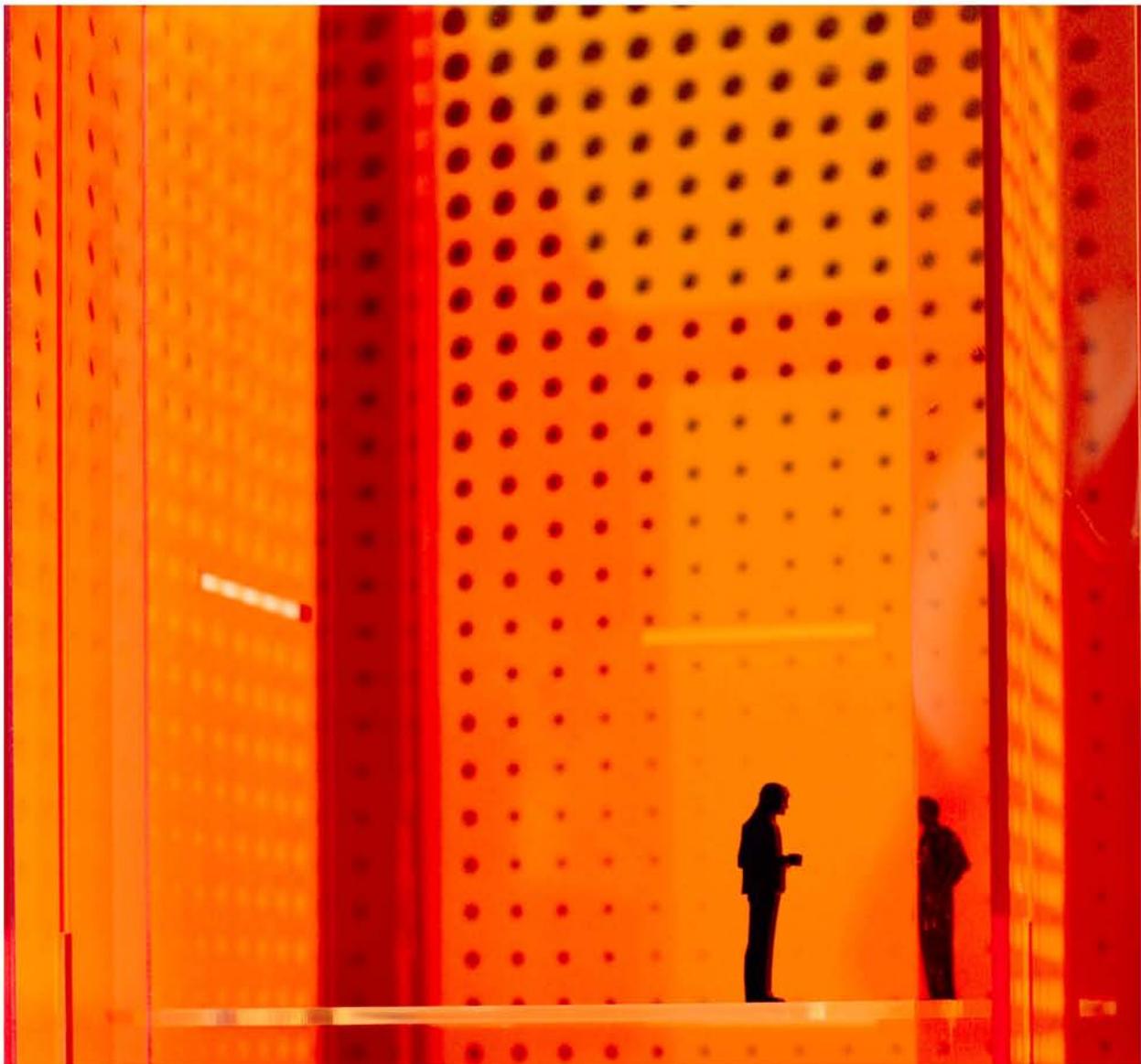


Figura 14. Prototipo: patrones de aberturas y capas

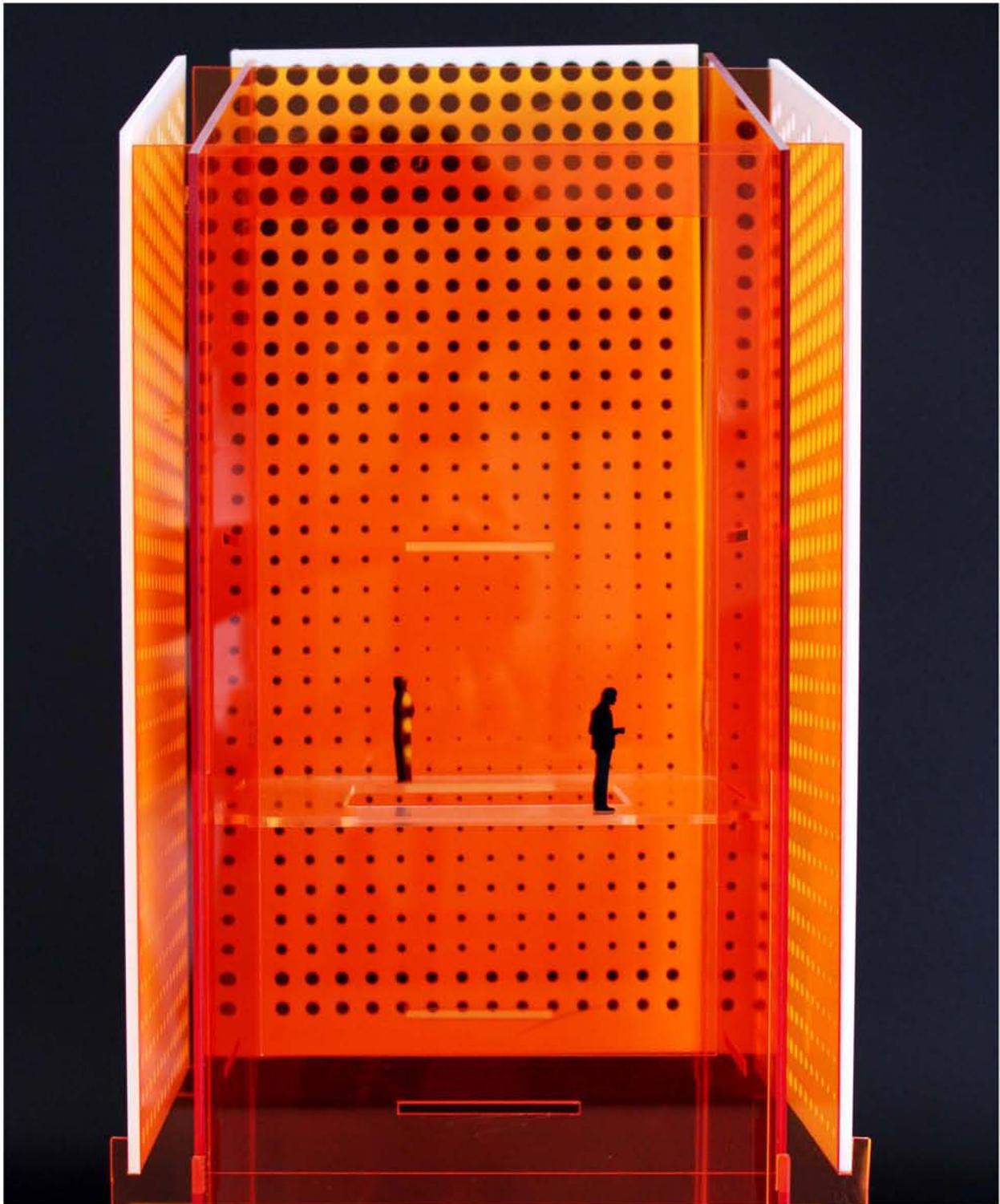


Figura 15. Prototipo de aberturas y capas

El prototipo de “aberturas y capas” desarrollado en modalidad de concepto, fue realizado mediante piezas diseñadas en Autodesk® AutoCAD® software, Rhinoceros® 5.0 software – Grasshopper y Autodesk® 3ds Max® software. También se utilizó un servo Hitec HS-422, un sensor de distancia y Arduino® Uno-R3 SMD con *IDE*.

5.2

Representación del prototipo seleccionado

El prototipo de envolvente cinética desarrollado tiene como característica la flexibilidad de funciones, en relación a las distintas disposiciones de movimiento. El prototipo de envolvente cinética consta de un módulo de 2.4 x 1.2 x 0.1 m, mediante el cual está constituido por dos marcos rígidos. El primer marco es utilizado como soporte estructural y el segundo marco interno es utilizado como una variante de movimiento pivotante en el eje vertical. El marco interno tiene dos capas de cristal de 6 mm de espesor cada una. En el interior delimitado por dos capas de cristal, anteriormente descritas, se disponen de quince franjas verticales de aerogel, a su vez, también tienen la característica de rotar en el eje vertical. Por lo tanto, los parámetros de regulación e intercambio son varios, dependiendo del ángulo de las franjas y del ángulo del marco secundario.

Es importante destacar las **diversas dimensiones** generales que puede tener el prototipo seleccionado. Es decir, se pueden reducir las dimensiones del marco y reducir el número de franjas de aerogel: formando módulos con **diversas proporciones** generales. Asimismo, la utilidad de solamente utilizar el prototipo de envolvente cinética únicamente para algunas **zonas estratégicas** de la envolvente. Aunado, a la posibilidad de rotar en el eje horizontal.

A continuación se muestra la representación del prototipo de envolvente cinética, figura 16.

En el ensayo de "THE SUN ALSO SHINES TODAY" de Florian Sauter (2007) se hace mención de la utilidad de vincular las diferencias de cada contexto a cada propuesta o modelo arquitectónico. El prototipo seleccionado busca relacionar diversos patrones de permisibilidad en relación a las diferentes situaciones generadas en diversos intervalos: relacionados con las necesidades de los usuarios. La forma "general" del prototipo seleccionado puede cambiar, sin embargo, el concepto de relacionar tiempo-espacio-forma prevalece. Referencia: Sauter, F. (2007). THE SUN ALSO SHINES TODAY. En Mateo, J. L. (Ed.), *Architectural Papers III: NATURAL METAPHOR; An Anthology of Essays of Architecture and Nature* (pp. 94-97). ACTAR.

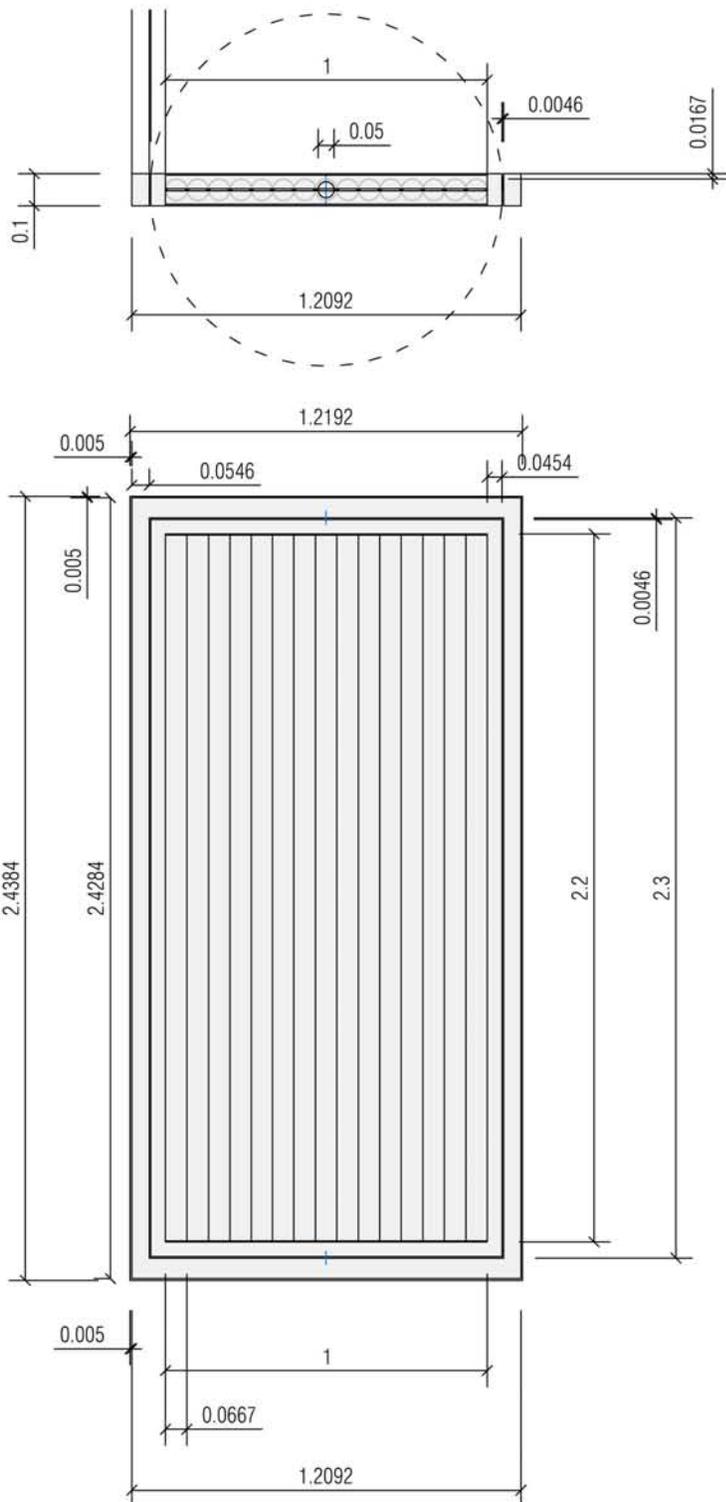


Figura 16. Prototipo de envolvente cinética

5.3

Características de movilidad

La envolvente tiene como característica cinética la capacidad de regular variables externas e internas mediante diversas estrategias de movilidad descritas a continuación:

- > La primera consta del movimiento de rotación en el eje vertical de las quince franjas de aerogel ubicadas en el interior del marco secundario. La capacidad de rotación es de 360°. Su función principal es la regulación del coeficiente de sombreado, el coeficiente de ganancia de calor solar y la transmitancia visible.
- > La segunda característica es la posibilidad de rotación en el eje vertical del marco secundario, es decir el marco que incluye las quince franjas de aerogel. La capacidad de rotación es de 360°. Su función principal es la regulación de los flujos de ventilación natural y la posibilidad de generar zonas de baja presión. Asimismo, puede cumplir la función de protección solar.
- > La tercera son las diversas combinaciones derivadas de las dos características de movilidad anteriormente descritas. Es decir, la movilidad de las quince franjas del marco interno en combinación con la rotación del marco interno.

Es conveniente destacar que en algunas situaciones solamente se dispondrá de las características de movilidad de las quince franjas del marco interno, excluyendo la movilidad total del marco interno. Además, se puede optar por diversificar las dimensiones totales de la envolvente cinética, mediante la reducción de la longitud de los marcos horizontales o verticales.

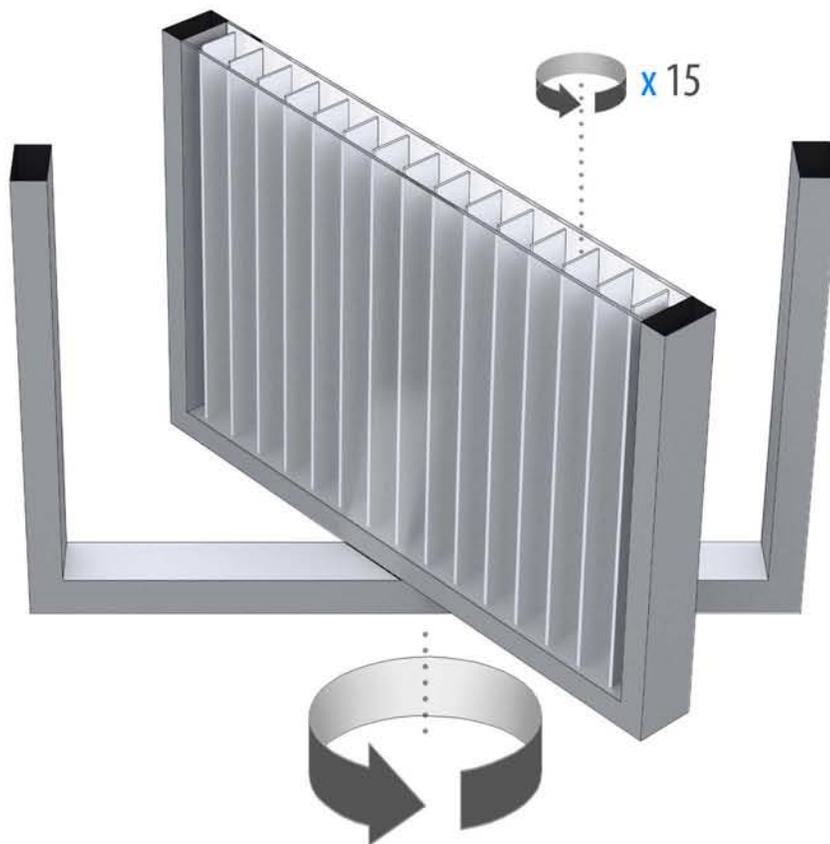


Figura 17. Capacidades de movimiento de la envolvente cinética

Movimientos de rotación en el eje vertical del marco con las franjas de aerogel y la rotación de cada una de las franjas de aerogel.

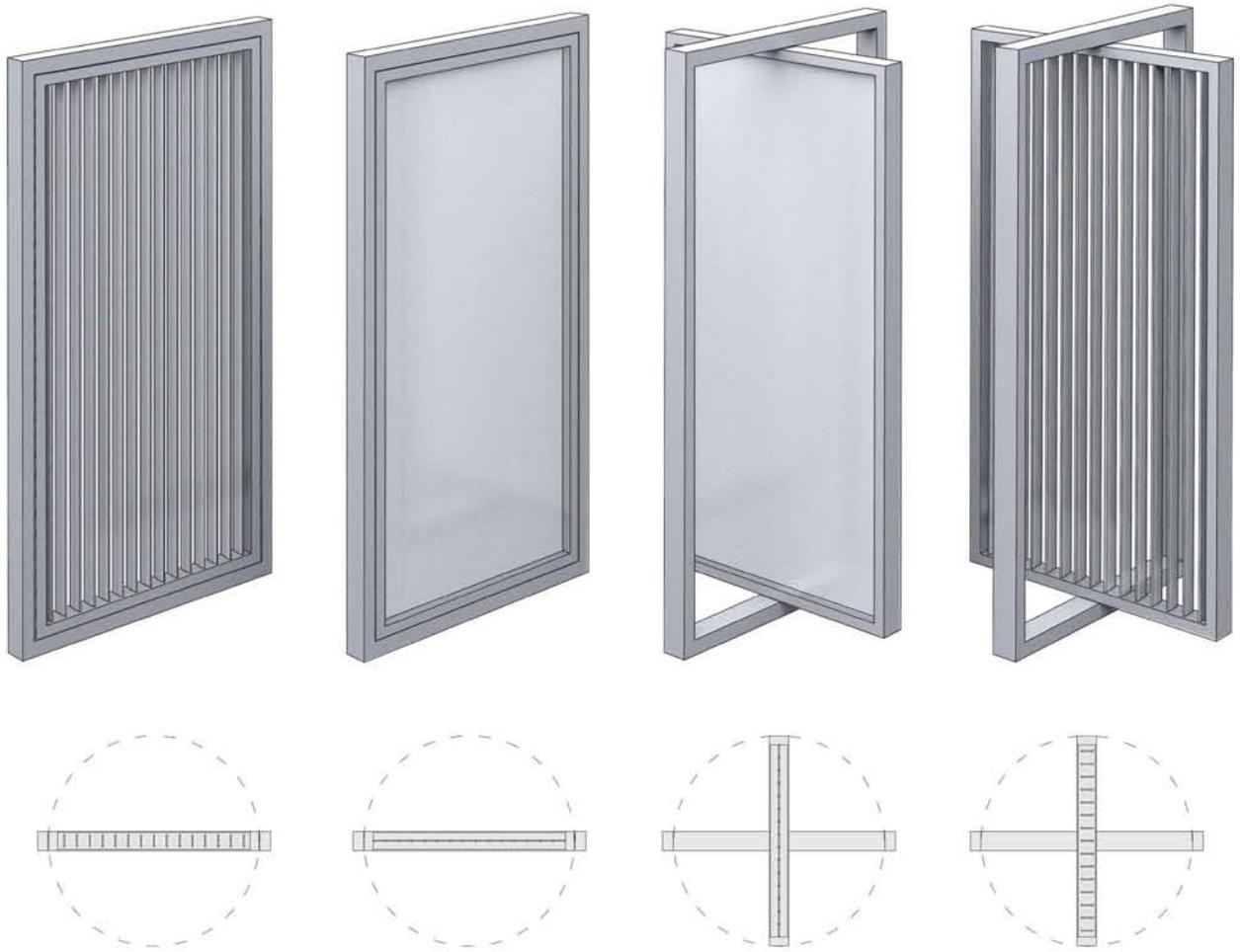


Figura 18. Principales fases de movimientos de la envolvente cinética

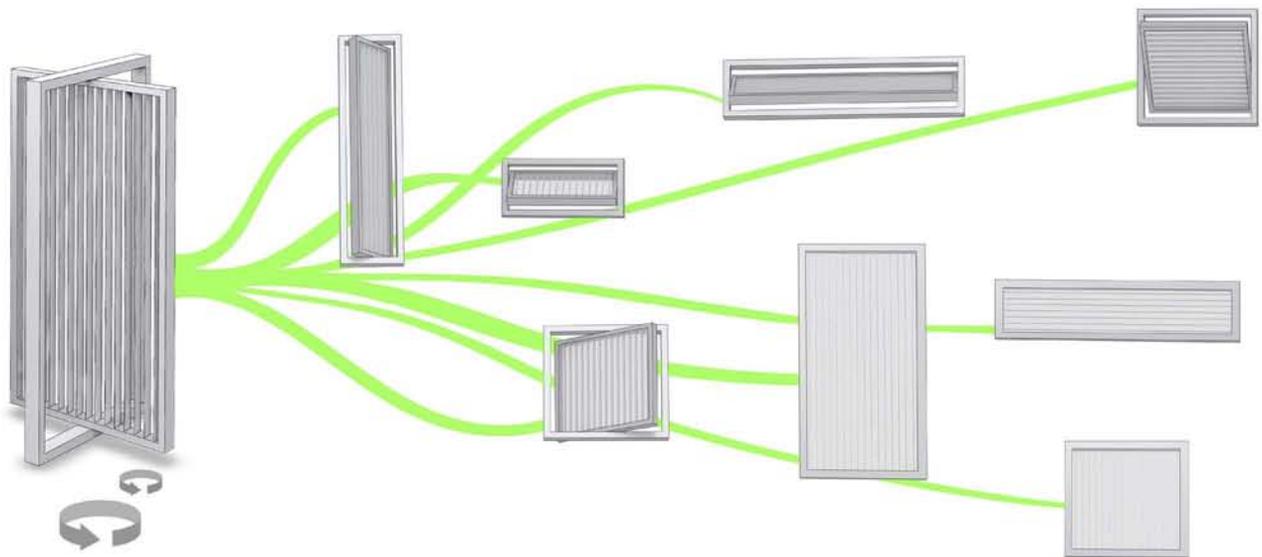


Figura 19. Diversidad de proporciones

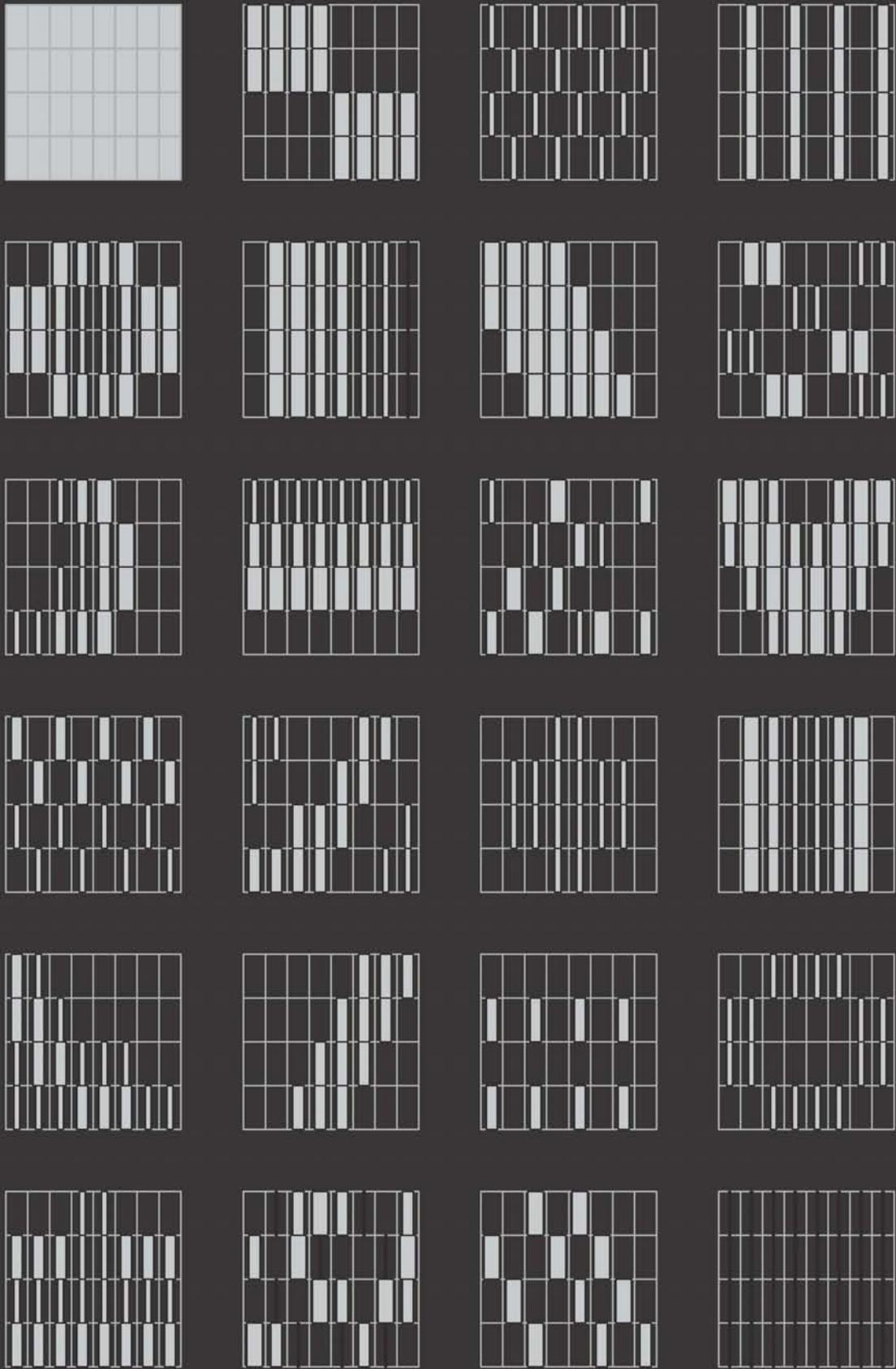


Figura 20. Patrones generados mediante la envolvente cinética

5.4

Autonomía energética y operativa

Las funciones cambiantes del prototipo de envolvente cinética, debido a la continua interacción con el medio ambiente y su posterior accionamiento ante determinada variable, hacen necesario de un proceso automatizado de procesamiento de datos. El procesamiento de datos autónomo llevado a cabo mediante hardware y software son alimentados por los datos enviados por los sensores. Los sensores están ubicados en el interior y el exterior del edificio con la finalidad de monitorear, tanto los recursos potenciales externos e internos, así como la factibilidad y eficiencia de accionar un cambio mediante el prototipo de envolvente cinética.

Asimismo, uno de los requerimientos para el funcionamiento óptimo de la envolvente cinética es la incorporación de una fuente de suministro energético, que a su vez pueda ser utilizado como sensor. Una de las posibilidades es de incorporar paneles fotovoltaicos en las franjas del marco interno. Asimismo, generadores eólicos en la azotea. Ambos casos, la incorporación de paneles fotovoltaicos y generadores eólicos, pudiendo funcionar como generadores de energía en el sistema y a su vez como fuente de suministro de datos de monitoreo. Con la finalidad de realizar un sistema autónomo en sus funciones de consumo energético y como modelo operativo.

En consecuencia, el modelo generado de envolvente cinética debido a sus características de autonomía operativa y energética, tiene la posibilidad de determinar estrategias que beneficien a los usuarios, en relación al medio ambiente.

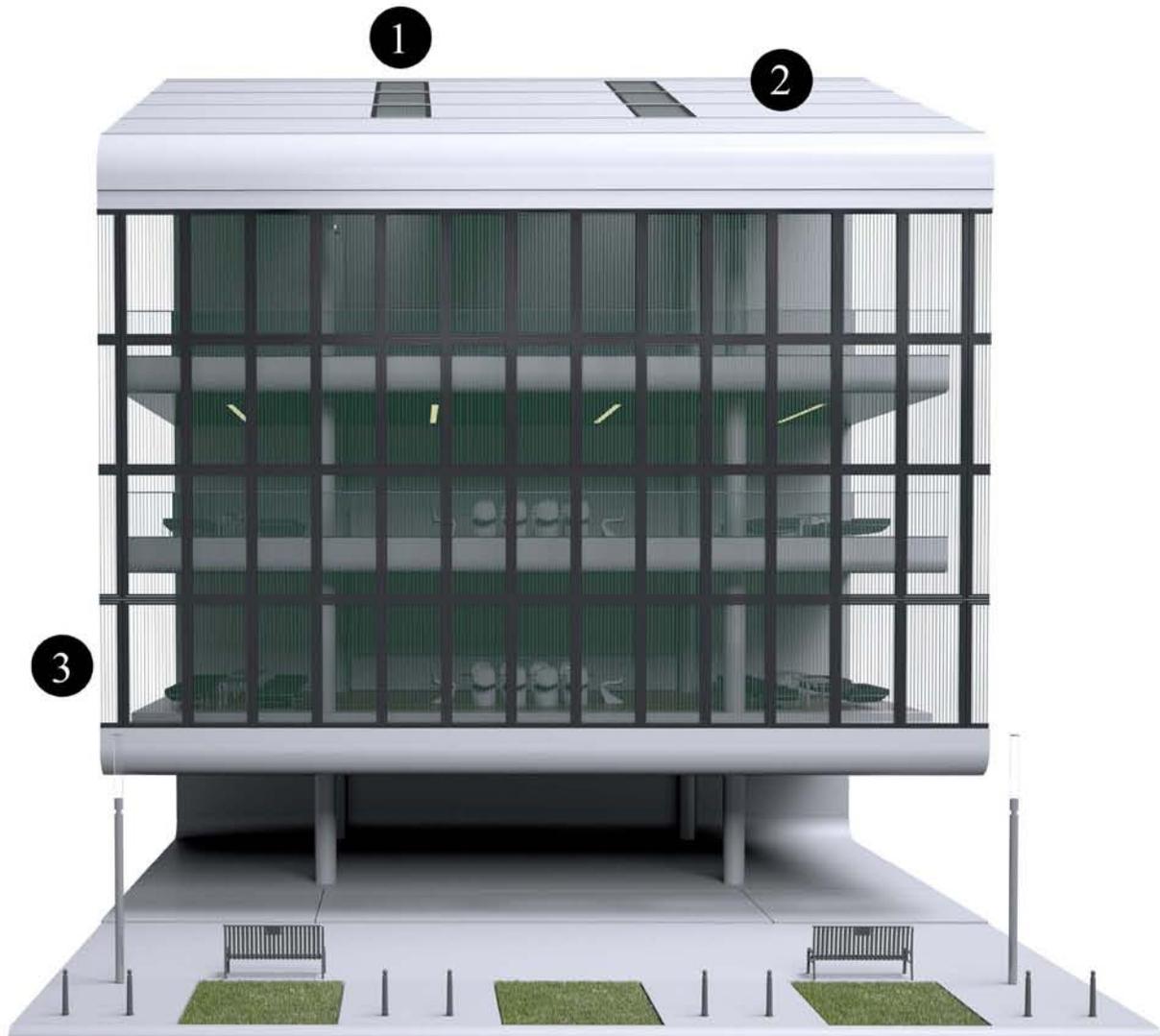


Figura 21. Autonomía energética

Nota: (1) Incorporación de paneles fotovoltaicos en la envolvente cinética. (2) Incorporación de paneles fotovoltaicos en otra ubicación, y la conexión al sistema de envolvente cinética. (3) La envolvente cinética puede utilizar la función de seguimiento solar o seleccionar la posición óptima para cada situación.

En las siguientes secciones se describe cada uno de los segmentos que forman el prototipo de envolvente cinética propuesto. El prototipo en términos generales está constituido por fuentes de *inputs*, el procesamiento de datos, acciones de respuesta (*outputs*), suministro energético autónomo, incorporación de materiales emergentes y la continua retroalimentación (*loops*).

Los datos introducidos al sistema de envolvente cinética, al igual que el proceso y los resultados o acciones, son recursos de datos factibles de ser utilizados para determinar las operaciones de estrategias cinéticas e incluso visualizar la información por diversos dispositivos electrónicos. Asimismo, es necesario implementar un sistema con capacidades para administrar y operar datos en proporciones masivas.

Para el desarrollo experimental de una envolvente cinética es posible incorporar MySQL[®] como el sistema administrador de base de datos y las diversas gestiones, aunado a que es *open source*. Al igual que la posibilidad de utilizar *Data-Driven Documents*, mejor conocido como D3.js. La visualización de datos mediante las diversas modalidades de representación y las posibilidades de interacción que ofrece D3.js: son características que pueden auxiliar a los usuarios a comprender un determinado contexto o situación mediante el diseño y disposición de la información, de manera casi intuitiva. En la galería de ejemplos de D3.js se muestran diversas modalidades de interacción y visualización para la Web. Algunas de las posibles aplicaciones de la gestión de una base de datos, la interacción con el usuario y su modalidad de representación o la visualización de datos: en relación a datos obtenidos mediante sensores, procesos y acciones o resultados, pueden ser las siguientes;

- > A. Cada estrategia de intercambio selectivo está en relación a acciones específicas que en su conjunto pueden formar una red especificando de manera interactiva las zonas accionadas. Las zonas accionadas, posiblemente representadas en puntos con gradientes en relación a su frecuencia o impacto, pueden auxiliar a los usuarios a comprender mejor el sistema de envolvente cinética ante determinadas condiciones del medio ambiente.
- > B. El intercambio de datos entre diversos sistemas de envolventes cinéticas. La interacción de datos posibilitan la generación de formas sub-derivadas de objetos de estudio preliminares a objetos avanzados. Es decir, el vínculo de características entre sistemas de envolventes cinéticas con un desarrollo continuo, implementando un proceso de evaluación y cambios a un objeto, componente o sistema, en el ámbito tangible e intangible.
- > C. El diseño de la forma de representar la información puede intervenir en la formulación de nuevas ideas o estrategias. Semejante a la evaluación de un objeto de estudio desde distintos enfoques.

Igualmente, se puede considerar plataformas como thinger.io para conectar dispositivos, almacenar y visualizar los datos suministrados como fuentes de input, entre otras características. Mediante un microcontrolador Arduino® Uno-R3 SMD y Arduino® Ethernet Shield 2, aunado a un sensor de temperatura y humedad (DHT-22), vinculado a la plataforma de thinger.io: se estructuraron las modalidades de visualización y otras características como; la posibilidad de compartir los datos con otros usuarios. A continuación se muestra la configuración de las modalidades de visualización realizadas en la plataforma de thinger.io:

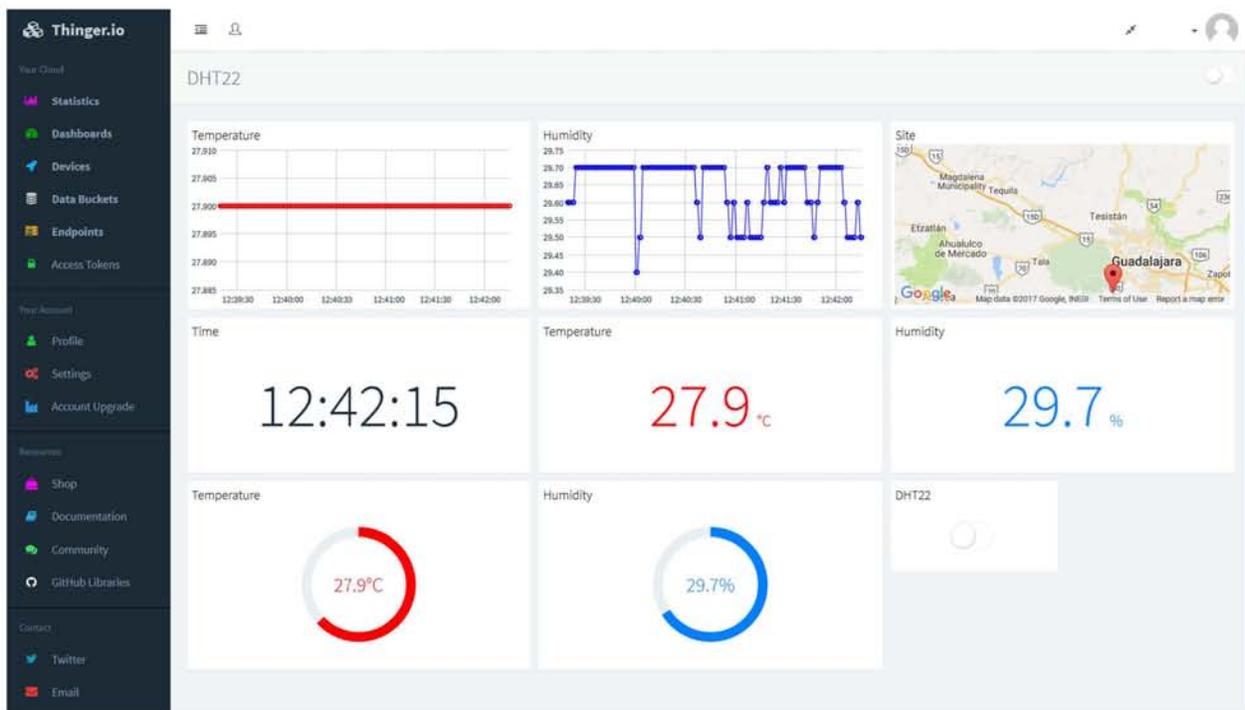


Figura 22. Captura de pantalla de la disposición realizada en la plataforma de Thingier.io

En consecuencia, considerando los distintos avances de gestión de bases de datos, modalidades de visualización, interacción con el usuario, autonomía operativa, intercambio de datos, entre otros temas, posibilitan en cierto modo un pensamiento colectivo con acciones locales. Potencialmente, lo tangible e intangible denotarán sus características y propiedades en relación al cambio, fundamentado en datos.

5.5

Desarrollo del espacio experimental

La envolvente cinética identificada como una delimitación espacial dinámica que interviene en el intercambio de variables del contexto medio ambiental y las condicionantes del interior del edificio de referencia. Aunado a la factibilidad de generar cambios en secuencias de tiempo relativamente cortos, en menos de un minuto, posibilitan el uso de los recursos externos de la temperie para el uso como recurso activo en el interior del edificio. Por ende, las funciones son varias, al igual que, la posibilidad de manipular distintas variables.

En las siguientes figuras elaboradas mediante Climate Consultant 6.0, desarrollado por UCLA Energy Design Tools Group, se muestra de manera gráfica las posibilidades y el potencial de accionar un intercambio selectivo utilizando los cambios del medio ambiente en relación al interior del edificio. Los datos mostrados a continuación son obtenidos de un formato EPW (Energy Plus Weather) para la Ciudad de México, sin embargo, se debe tener reservas en la precisión de los datos generados del archivo descargado (.epw).

En las siguientes dos figuras, figuras 23 y 24, se muestra la proyección equidistante del recorrido del Sol para la Ciudad de México, incorporando referencias de temperatura. Las proyecciones equidistantes son utilizadas como referencia para adoptar distintas estrategias a lo largo del año. Asimismo, se pueden observar las horas en las cuales se necesita de un sistema de protección solar con el objetivo de regular la temperatura del interior del edificio en rangos adecuados de confort térmico.

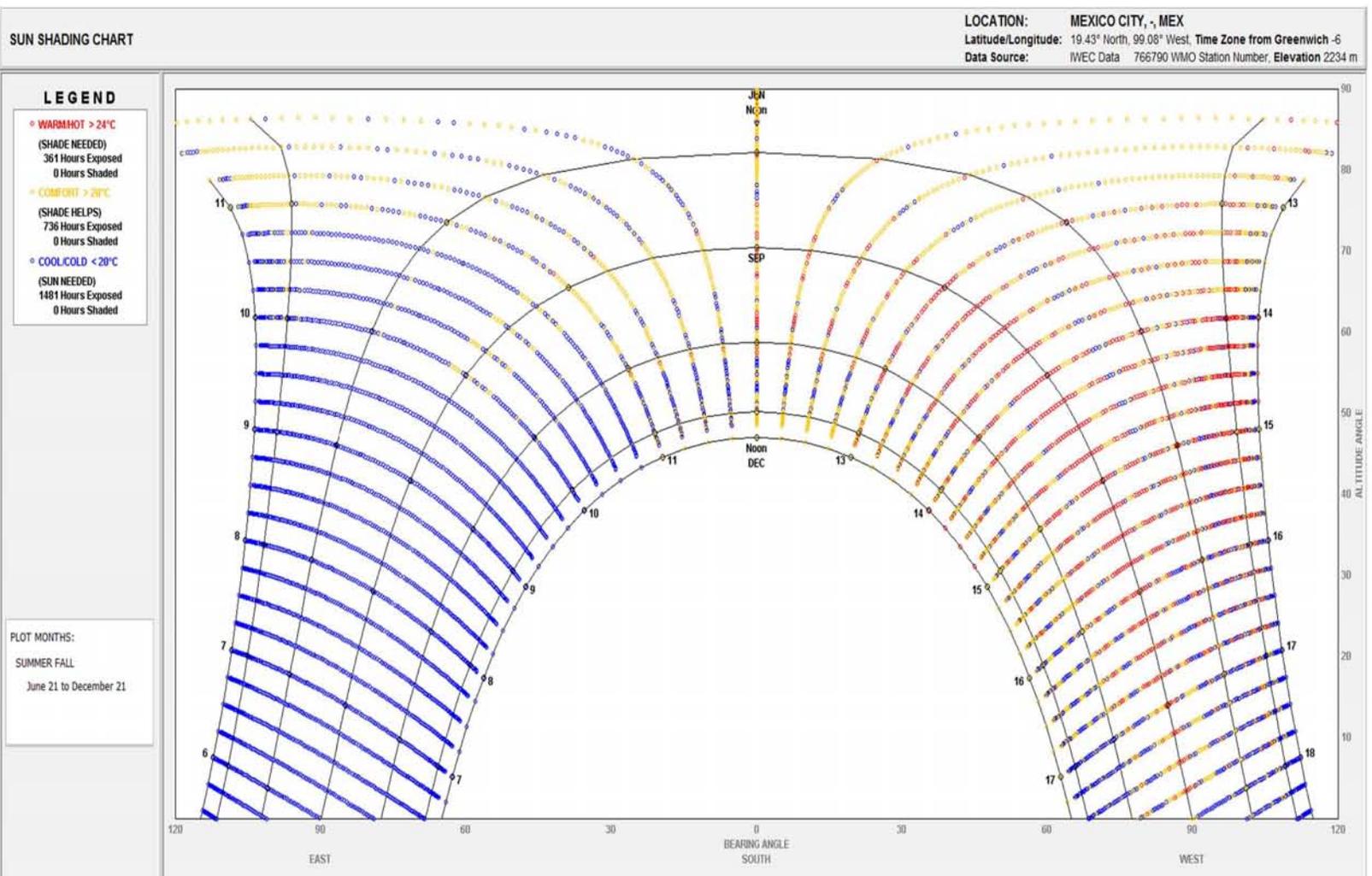


Figura 24. Proyección equidistante del Sol con referencias de temperatura del 21 de Junio al 21 de diciembre del 2015, en la Ciudad de México

Fuente: Realizado mediante Climate Consultant 6.0. Los datos son obtenidos de un formato EPW (*Energy Plus Weather*). Climate Consultant 6.0 fue desarrollado por UCLA Energy Design Tools Group.

En la figura 25 se muestran los rangos de temperatura en la Ciudad de México, dividido por meses y una representación anual. En el área marcada con gris se identifica el rango de zona de confort. En consecuencia se tienen indicadores para adoptar distintas estrategias mediante la envolvente cinética. Cuando la temperatura es menor a aproximadamente 18°C, se pueden adoptar estrategias de inercia térmica, primordialmente durante la noche. Cuando se requiera de un proceso de enfriamiento se procede a restringir el acceso de la incidencia solar hacia el interior del edificio.

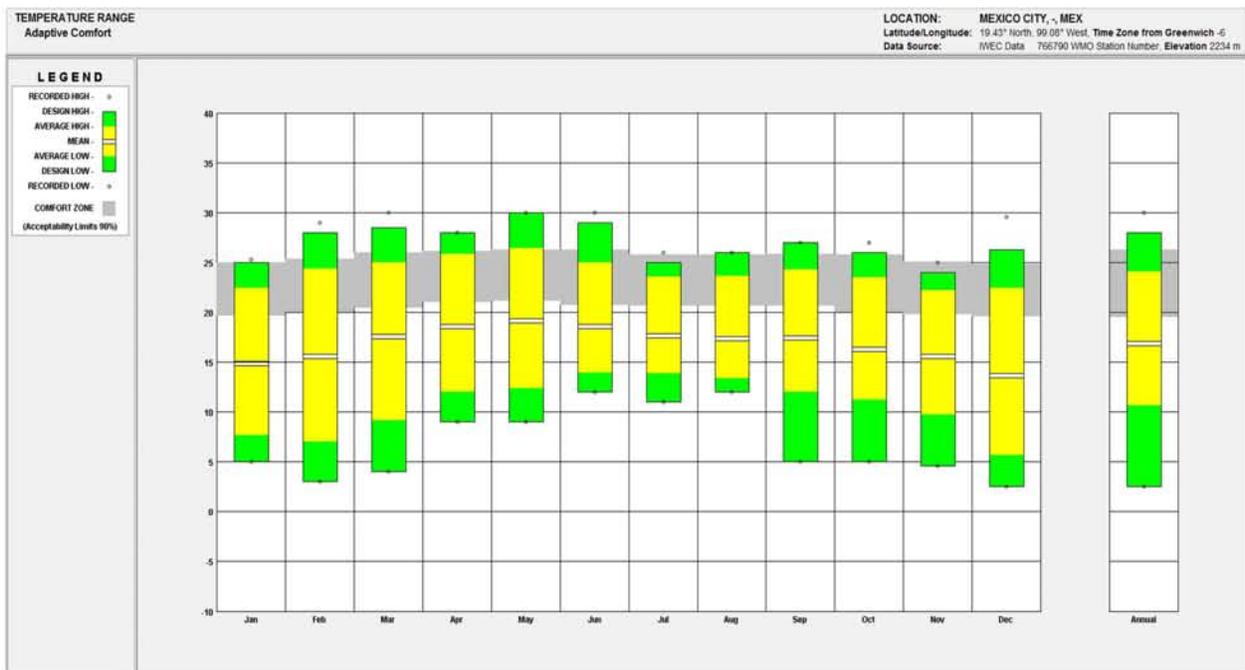


Figura 25. Rangos de temperatura en la Ciudad de México

Fuente: Realizado mediante Climate Consultant 6.0. Los datos son obtenidos de un formato EPW (*Energy Plus Weather*). Climate Consultant 6.0 fue desarrollado por UCLA Energy Design Tools Group.

El viento debido a la variabilidad de la dirección afectada por el contexto y la variabilidad de la velocidad, es dependiente del monitoreo para su inmediato uso mediante el prototipo de envolvente cinética. En las simulaciones realizadas de ventilación natural, descritas en los siguientes segmentos, se identificaron diferencias de flujos de ventilación hacia el interior del edificio en relación a la posición del prototipo. Por lo tanto, el re-direccionamiento de los flujos del viento es una posibilidad más para implementar por medio de la envolvente cinética.

Para el experimento se dispondrán de algoritmos que estarán actuando en los rangos de intensidad deseados obtenidos mediante los sensores. A continuación se describe de manera general las variables seleccionadas para el análisis del prototipo de envolvente cinética:

- > 1. El coeficiente de sombreado, *Shading Coefficient (SC)*, es la relación que existe entre el sistema de protección solar otorgado a un espacio interior de referencia.
- > 2. El coeficiente de ganancia de calor solar, *Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)*, entendido como la habilidad de resistencia de calor por medio de la radiación, convección y conducción de una envolvente, con la finalidad de tener un buen aislamiento térmico y protección ante la radiación solar.
- > 3. La transmitancia visible, *Visible Transmittance (VT)*, es la cantidad de ondas electromagnéticas en el rango visible que ingresa al edificio. El valor de transmitancia visible es importante debido al gasto energético vinculado a una protección solar que no permite el paso de la radiación solar y en consecuencia tampoco la luz, con el inconveniente de tener que emplear energía eléctrica para activar el sistema de iluminación artificial del edificio. En consecuencia, el sistema de protección de incidencia solar estaría reduciendo su eficacia al no permitir cierto porcentaje de VT en el edificio.
- > 4. La ventilación natural generada por las distintas diferencias de presión del aire, generándose flujos de viento.

Igualmente, tomando en cuenta el rango de funcionamiento del prototipo, es posible incorporar distintas variables. Al incorporar más variables, el algoritmo operativo deberá determinar cuáles son las condiciones deseadas o de mayor jerarquía mediante el flujo de datos. Debido a las características de movilidad del prototipo, se realizarán análisis en distintas etapas o su equivalencia en ángulos, con la finalidad de determinar la relación de un movimiento con una posible solución requerida. A continuación se muestra un esquema general del funcionamiento del prototipo de envolvente cinética:

Envolvente Cinética

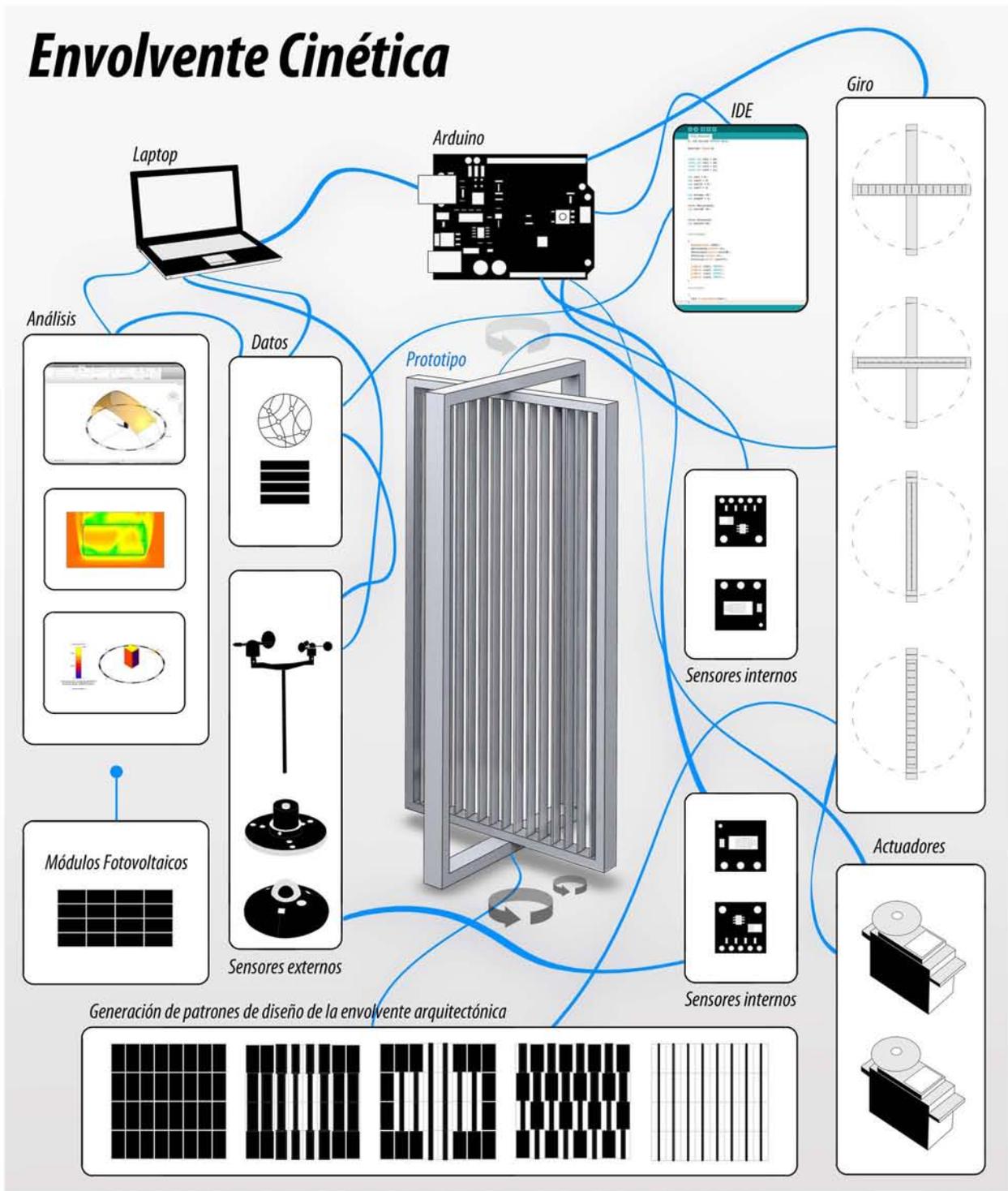


Figura 26. Esquema de la estructura del funcionamiento general del prototipo de envolvente cinética

5.5.1

Diseño del módulo experimental

Se desarrolló un módulo experimental con la finalidad de analizar en físico las características de movilidad del prototipo de envolvente cinética. Se diseñó un espacio delimitado con una cara expuesta para colocar el prototipo. El prototipo colocado fue diseñado en Autodesk® AutoCAD® software y SOLIDWORKS® 3D CAD software. Las piezas son de acrílico y fue cortado con láser, con el objetivo de incorporar las características de movilidad de la manera más precisa. El prototipo desarrollado en físico tiene la capacidad de activar, mediante distintos ángulos de rotación vertical, las franjas de aerogel como barrera de aislamiento. Asimismo, el prototipo fue conectado con los sensores, el microcontrolador Arduino® Uno-R3 SMD y los servos que ejecutan el movimiento, permitiendo el adecuado posicionamiento de las franjas de aerogel. Los datos adquiridos por los sensores son procesados mediante el microcontrolador en conjunción con los algoritmos configurados en IDE. Los datos obtenidos fueron, a su vez, graficados automáticamente en Microsoft® Excel, subdividido por las distintas variables medidas.

El módulo experimental mide en las aristas externas 0.346 x 0.425 x 0.4 m de altura. El módulo tiene un volumen efectivo de 0.0379 m³, sus aristas internas tienen las siguientes dimensiones: 0.295 x 0.347 x 0.3710 m de altura. A continuación se muestra el módulo experimental.

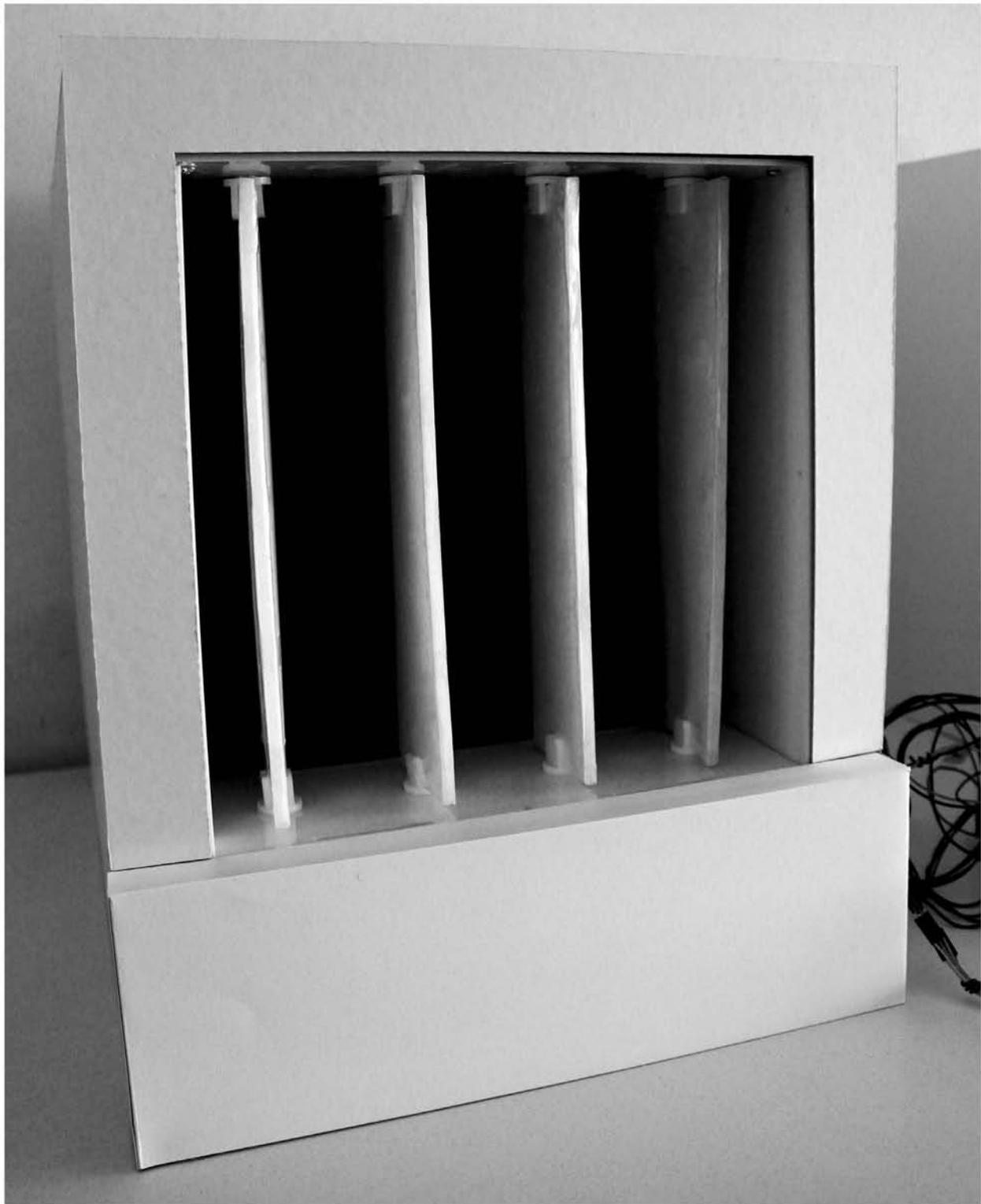


Figura 27. Prototipo de envolvente cinética

En la imagen se muestra el prototipo de envolvente cinética conectado al microcontrolador Arduino® Uno-R3 SMD con los sensores. Las franjas verticales son de aerogel *Thermal Wrap*™ de 6-mm de espesor, realizado por Cabot® Aerogel.

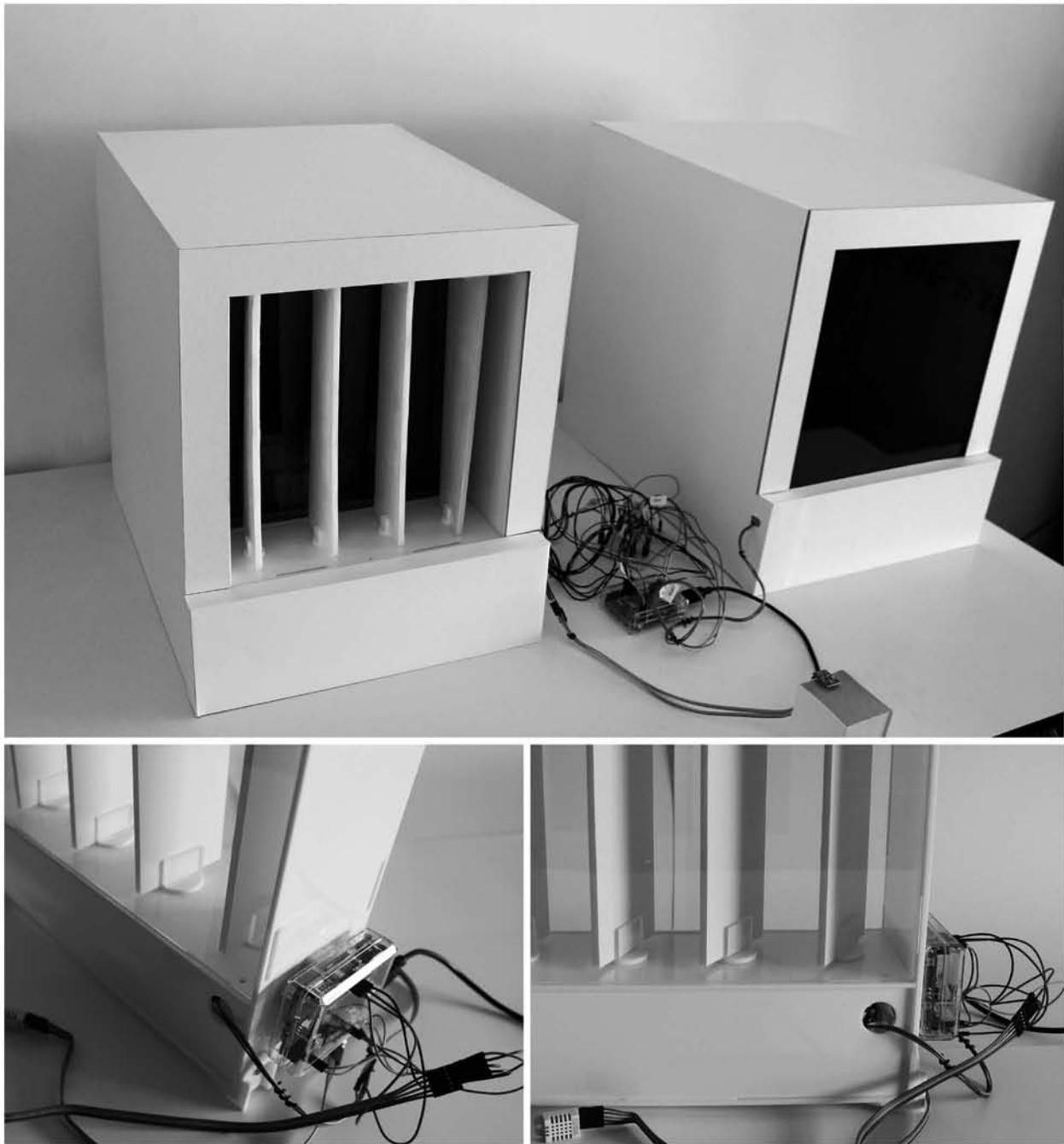


Figura 28. Módulo experimental

En la imagen se pueden observar dos módulos. El módulo ubicado a la izquierda, tiene colocado el prototipo de envolvente cinética. El módulo ubicado a la derecha, fue utilizado como referencia para determinar las diferencias entre los dos módulos. Es conveniente mencionar que el prototipo solamente fue desarrollado a nivel de prototipo con las funciones de movilidad básicas, en continua relación con los sensores colocados al interior y al exterior de los módulos.

5.5.2 Materiales

El módulo experimental tiene como barrera de aislamiento franjas de aerogel de 6mm de espesor. A continuación se describen las características del aerogel empleado:



Thermal Wrap™ 6-mm. Realizado por Cabot® Aerogel constituido por aerogel de silica. Su conductividad térmica es de $23\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ a temperatura ambiente. Su temperatura operativa es de -200°C a 125°C . Transmisión de luz del 20% con un espesor de 8mm. Densidad de $\sim 70\text{kg/m}^3$ ($\sim 4.4\text{lb/ft}^3$). Resistencia a la tensión de $\sim 517\text{kPa}$ ($\sim 75\text{lbs/in}^2$). Composición de la fibra de poliéster y polietileno. (Información obtenida de Cabot® Aerogel).

El módulo experimental tiene como delimitación espacial Foamular® 250 (poliestireno extruido, XPS) de 1" de espesor en sus caras. Las propiedades de aislamiento del Foamular® 250 son las siguientes:

Resistencia térmica a una temperatura de 24°C :

Valor R de; 5.0 y 0.88 hr ft² °F/Btu (RSI, °C m²/W). Método de prueba ASTM C518.

5.5.3

Sensores y actuadores

Sensores utilizados:

- > Sensores de temperatura y humedad
RHT03
- > Sensores de luminosidad
TSL2561

El sensor de luminosidad TSL2561, utilizando a su vez Arduino®, fue calibrado mediante el sensor LM-8000. Se calculó la nueva constante de calibración (K_n), calculada con un valor de 0.8116. Los datos fueron comparados nuevamente con la K_n calculada, con la finalidad de verificar los datos obtenidos. Los resultados fueron favorables, debido a la obtención de los datos en un rango entre 0.95 y 1.05 ($0.95 < R_v < 1.05$).

Actuadores utilizados:

- > Servo - Hitec HS-422 (Tamaño standard).
- > Para las pruebas de movilidad del prototipo de envoltorio cinética se adquirió un segmento de hoja de polímero con memoria de forma. Puede tomar una nueva forma cuando se calienta por encima de los 70°C. Sus dimensiones son de 100mm x 150mm x 3mm de espesor.

5.5.4 Hardware

Se utilizó Arduino® debido a las capacidades de incorporar sensores y utilizar el software integrado de IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino® es una combinación de hardware y software, facilitando los procesos de manipulación y transferencia de datos adquiridos hasta la obtención de uno o varios *outputs*. Para el desarrollo del prototipo se utilizó primordialmente Arduino® Uno-R3 SMD y Arduino® Mega 2560 R3.

A continuación se describen las especificaciones técnicas de los microcontroladores de Arduino® utilizados:



Arduino® Uno-R3 SMD:
Microcontrolador: ATmega328.
Voltaje de operación: 5 V.
Suministro de voltaje recomendado: 7-12 V.
Límites de voltaje suministrado: 6-20 V.
Digital I/O Pins: 14 (de los cuales 6 proveen de un *output* PWM).
Pins análogos (*input*): 6.
(Información obtenida de la página oficial de Arduino®: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUnoSMD>, 13/08/16)



Arduino® Mega 2560 R3:
Microcontrolador: ATmega2560.
Voltaje de operación: 5 V.
Suministro de voltaje recomendado: 7-12 V.
Límites de voltaje suministrado: 6-20 V.
Digital I/O Pins: 54 (de los cuales 15 proveen de un *output* PWM).
Pins análogos (*input*): 16.
(Información obtenida de la página oficial de Arduino®: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, 13/08/16)

Uno de los aspectos importantes a considerar en el uso de microcontroladores es la capacidad de simplificar el procesamiento de los datos. Para ello es comprensible que en el nivel de desarrollo de un prototipo aún no se haya optimizado el sistema y se recurra a un mayor número de instrumentos y equipos. Sin embargo, a largo plazo, es necesario reducir a una mínima expresión utilitaria el funcionamiento del prototipo.

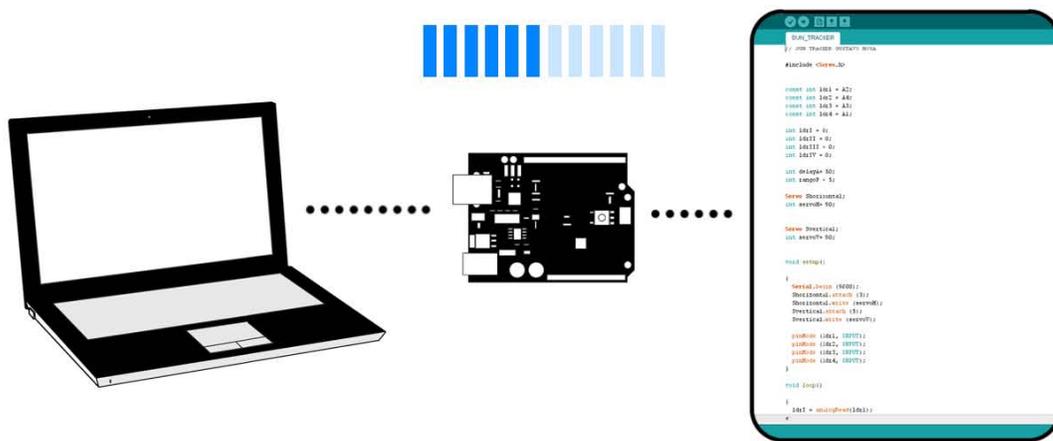


Figura 29. Representación de la interconexión del microcontrolador

5.5.5 Software

Se utilizó el software de Arduino® IDE (*Integrated Development Environment*) para la manipulación de los algoritmos en relación a los datos obtenidos y su culminación en uno o varios *outputs*. Es decir, la obtención de los datos registrados mediante los sensores conectados al microcontrolador para su procesamiento y transferencia, para obtener un *output* del proceso numérico. La envolvente cinética, precisamente por tener características móviles, requiere del procesamiento de datos de determinadas variables del medio ambiente y del interior del edificio de referencia.

Un algoritmo es un conjunto de pasos a seguir para obtener un resultado óptimo previamente estudiado y diseñado con la finalidad de obtener un algoritmo eficiente. Un algoritmo funciona mediante flujos de operaciones determinados mediante filtros condicionales. El resultado del procesamiento de los datos puede corresponder a una acción tangible o intangible.

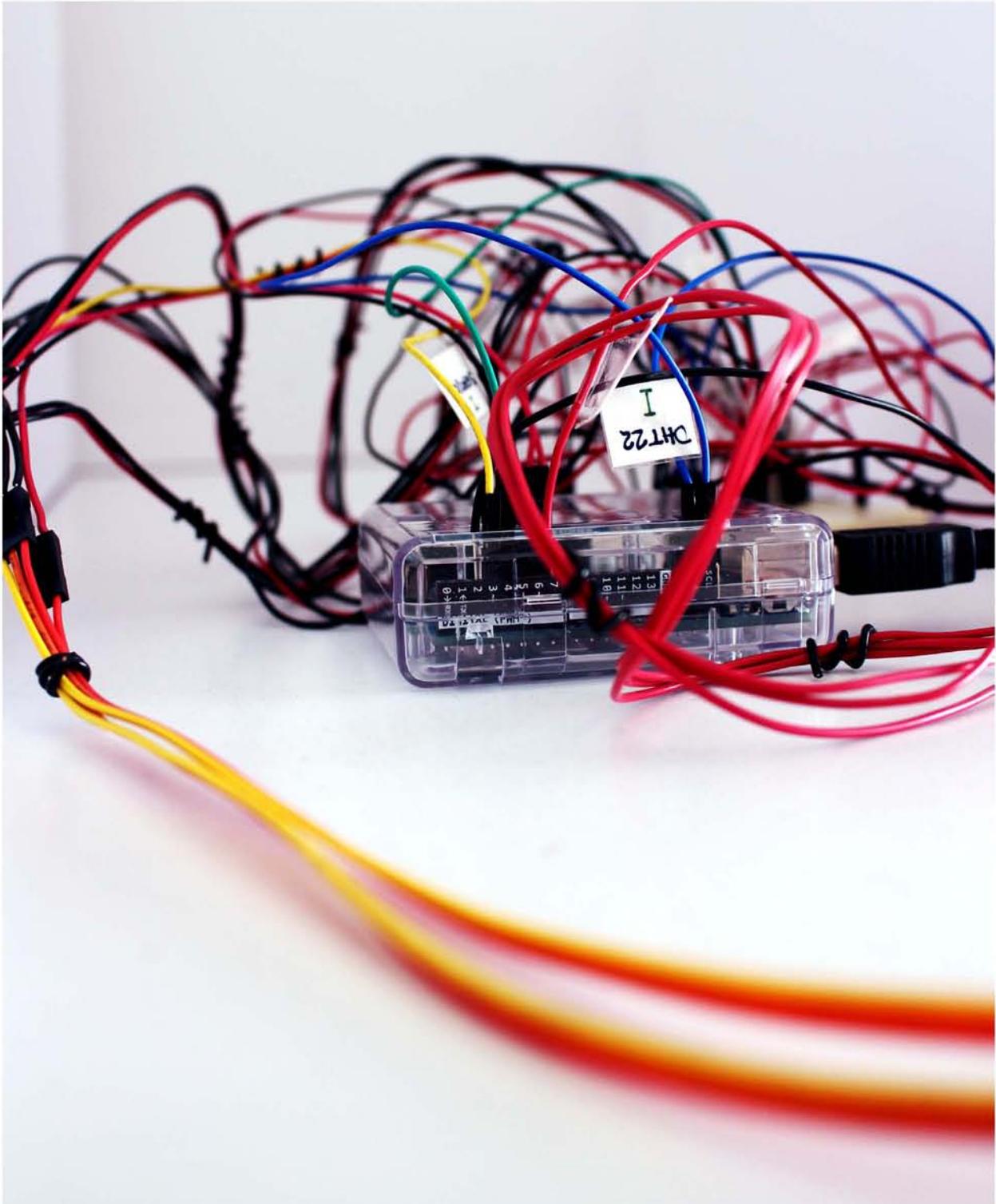


Figura 30. Configuración de la envolvente en Arduino® IDE

En general los algoritmos son de gran utilidad debido a la multiplicidad de funciones y sus diversas aplicaciones.

5.6

Análisis de las simulaciones digitales

Análisis de desempeño térmico

Se realizó el análisis del desempeño térmico del prototipo de envolvente cinética mediante: BERKELEY LAB WINDOW v7.4.6.0 Glazing System Thermal and Optical Properties. Window V7.4 utiliza datos de ASHRAE SPC142, ISO 15099 y de NFRC. Es utilizado en los laboratorios de *National Fenestration Rating Council* (NFRC) para nuevos certificados. Asimismo, NFRC está acreditado por *American National Standard Institute* (ANSI). El análisis se llevó a cabo en distintos ángulos de movimiento respecto a las franjas de aerogel.

El sistema de envolvente cinética está compuesto por tres capas (*layers*) y los dos marcos, de los cuales solamente el marco interno puede girar en el eje vertical en la modalidad de aprovechamiento de la ventilación natural. A continuación se describen las tres capas del sistema:

- > a. La primera capa es; TROSIFOL® 090 XT_SP laminado, tiene un espesor de 6.375 mm, y una conductividad de 0.442 W/m K.
- > b. La segunda capa es; Thermal Wrap™ Cabot® Aerogel, tiene un espesor de 6.0 mm, conductividad de 23mW/m K a temperatura ambiente, y una densidad de ~70kg/m³.
- > c. La tercera capa es; TROSIFOL® 090 XT_SP laminado, tiene un espesor de 6.375 mm, y una conductividad de 0.442 W/m K.

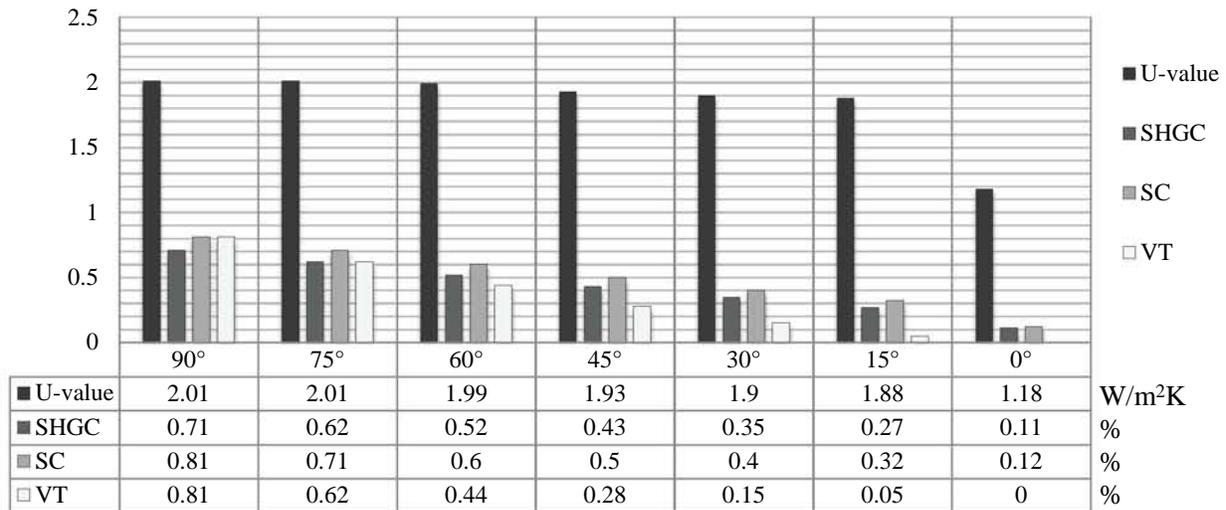


Figura 31. Resultados del desempeño térmico de la envolvente cinética en relación al ángulo de abertura (*Glazing system*)

En la figura 31 se puede observar la factibilidad de regular los valores de SHGC, SC, VT y el valor U, mediante las diversas etapas móviles de la envolvente. El rango de utilidad, en relación a la estrategia a adoptar es favorable, debido a la permisibilidad selectiva de intercambio mediante el ángulo de abertura de la envolvente.

Mediante las simulaciones realizadas en BERKELEY LAB WINDOW v7.4.6.0 *Glazing System Thermal and Optical Properties* se obtuvieron también algunos parámetros de transmisión de energía solar y transmisión de iluminación del espectro visible desde la superficie frontal de la envolvente. En las siguientes figuras, figuras 32 a 39, solamente se muestran los ángulos con los valores más distintivos, de acuerdo al grado de abertura de las franjas de aerogel de la envolvente y el parámetro del coeficiente susceptible a ser utilizado. Los valores se pueden identificar por la hora y mes, en el transcurso de un año: relacionado al coeficiente de 0 a 1. Asimismo, para la orientación norte, sur, este y oeste.

A continuación se muestra el análisis de transmisión de energía solar, en distintas modalidades de movimiento (permisibilidad) y en las cuatro orientaciones:

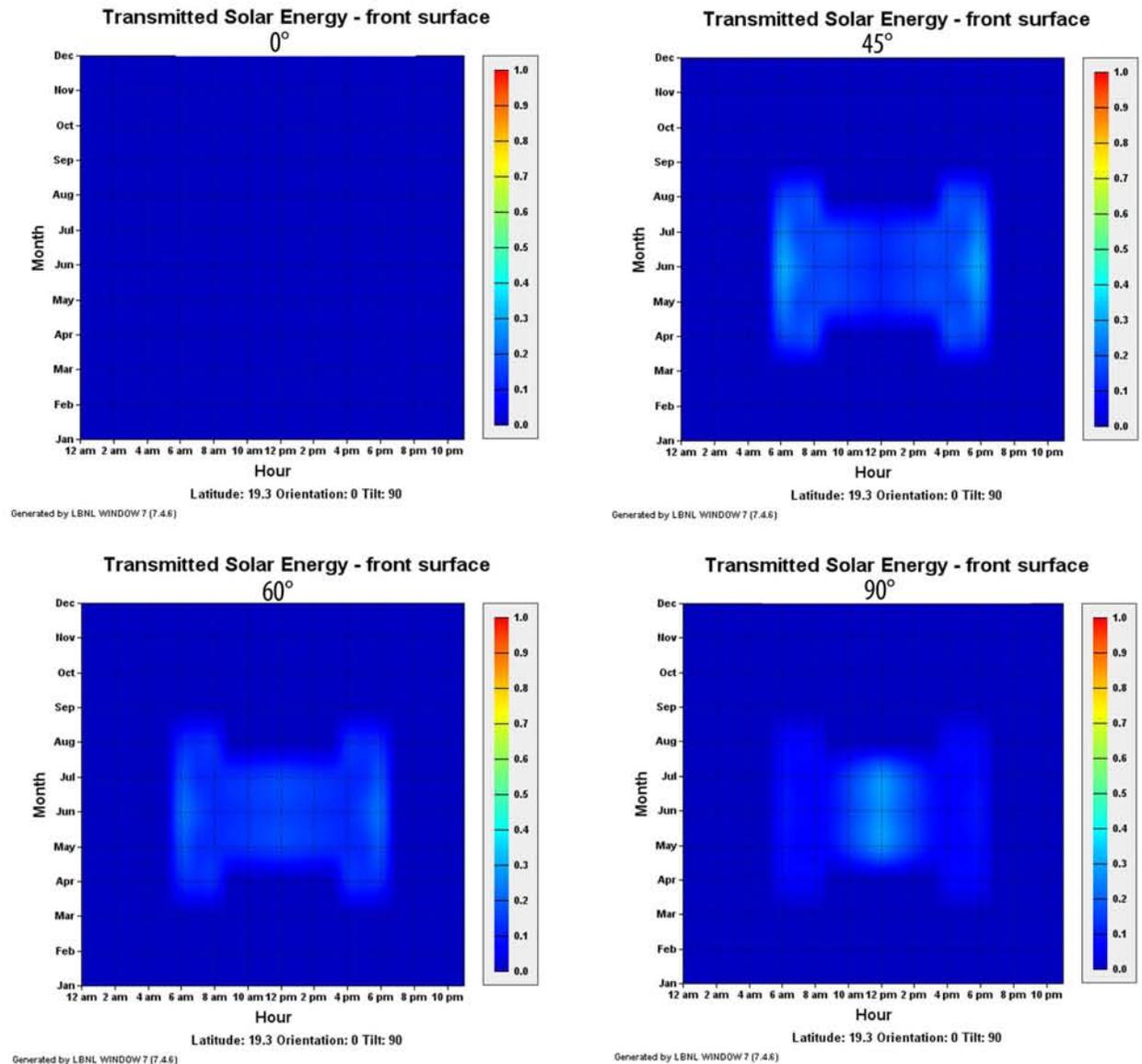


Figura 32. Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación norte

Se observa el incremento de la transmisión de energía solar, en el solsticio de verano, debido a la latitud seleccionada (Ciudad de México).

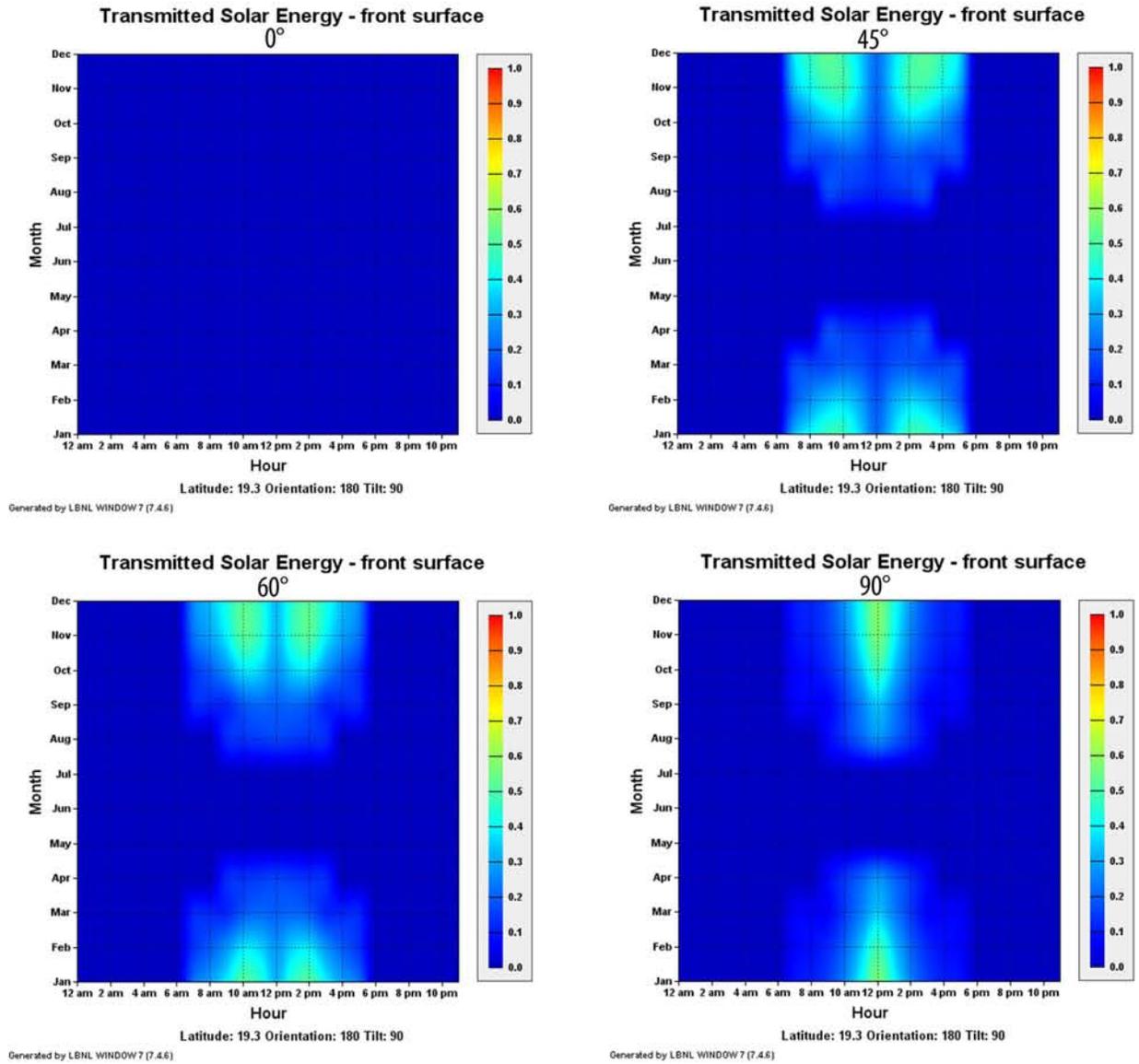


Figura 33. Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación sur

Se puede observar el incremento de la transmisión de energía solar en el solsticio de invierno, debido a la latitud seleccionada.

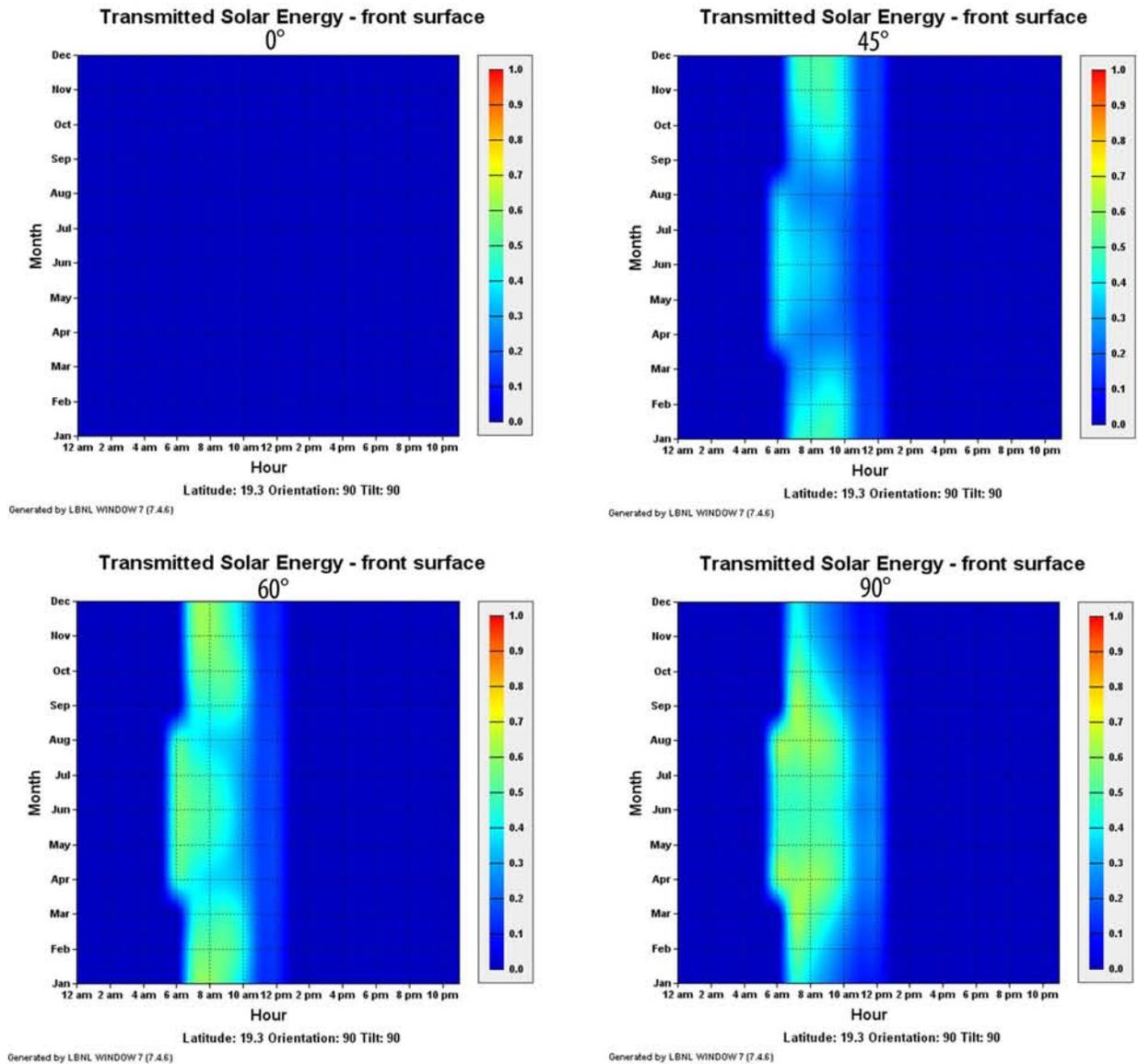


Figura 34. Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación este

La transmisión de energía solar durante las primeras horas del día, puede ser utilizado de manera estratégica desde un enfoque de protección o permisibilidad.

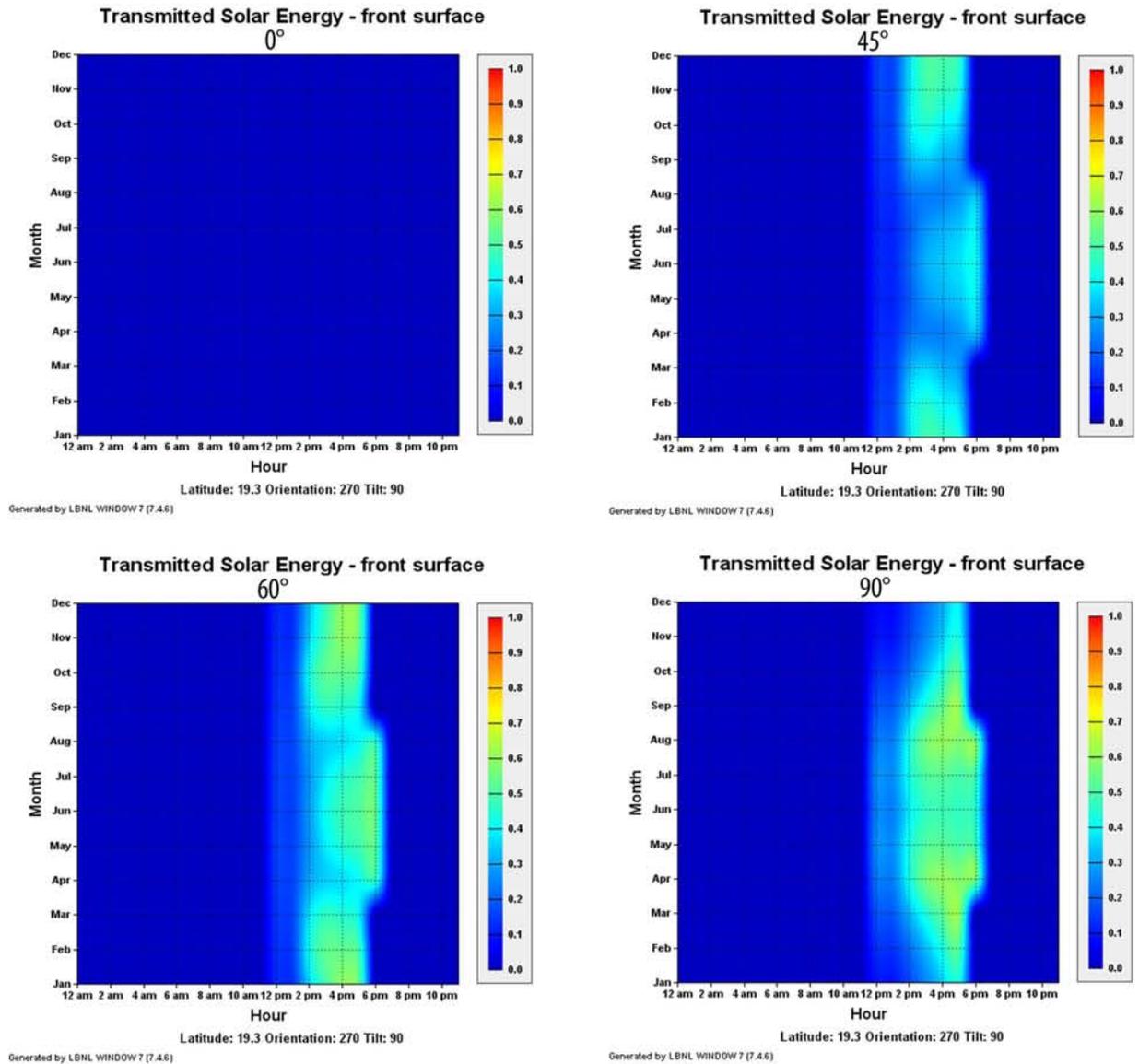


Figura 35. Transmisión de energía solar en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación oeste

La transmisión de energía solar, posterior a las 12 pm, puede ser utilizado de manera estratégica desde un enfoque de protección o permisibilidad.

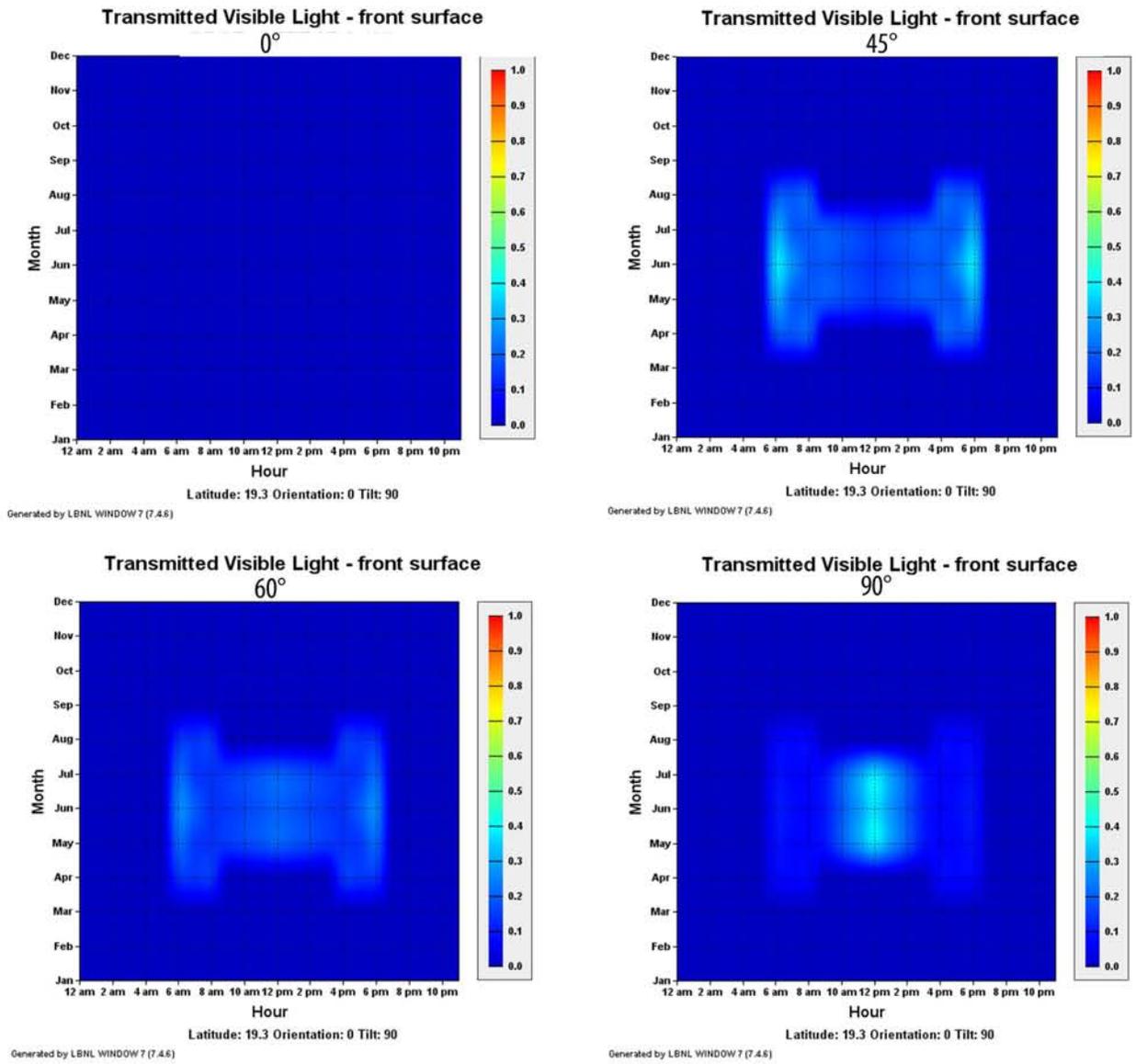


Figura 36. Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación norte

La transmisión de iluminación en el espectro visible, aumenta en la proximidad del solsticio de verano.

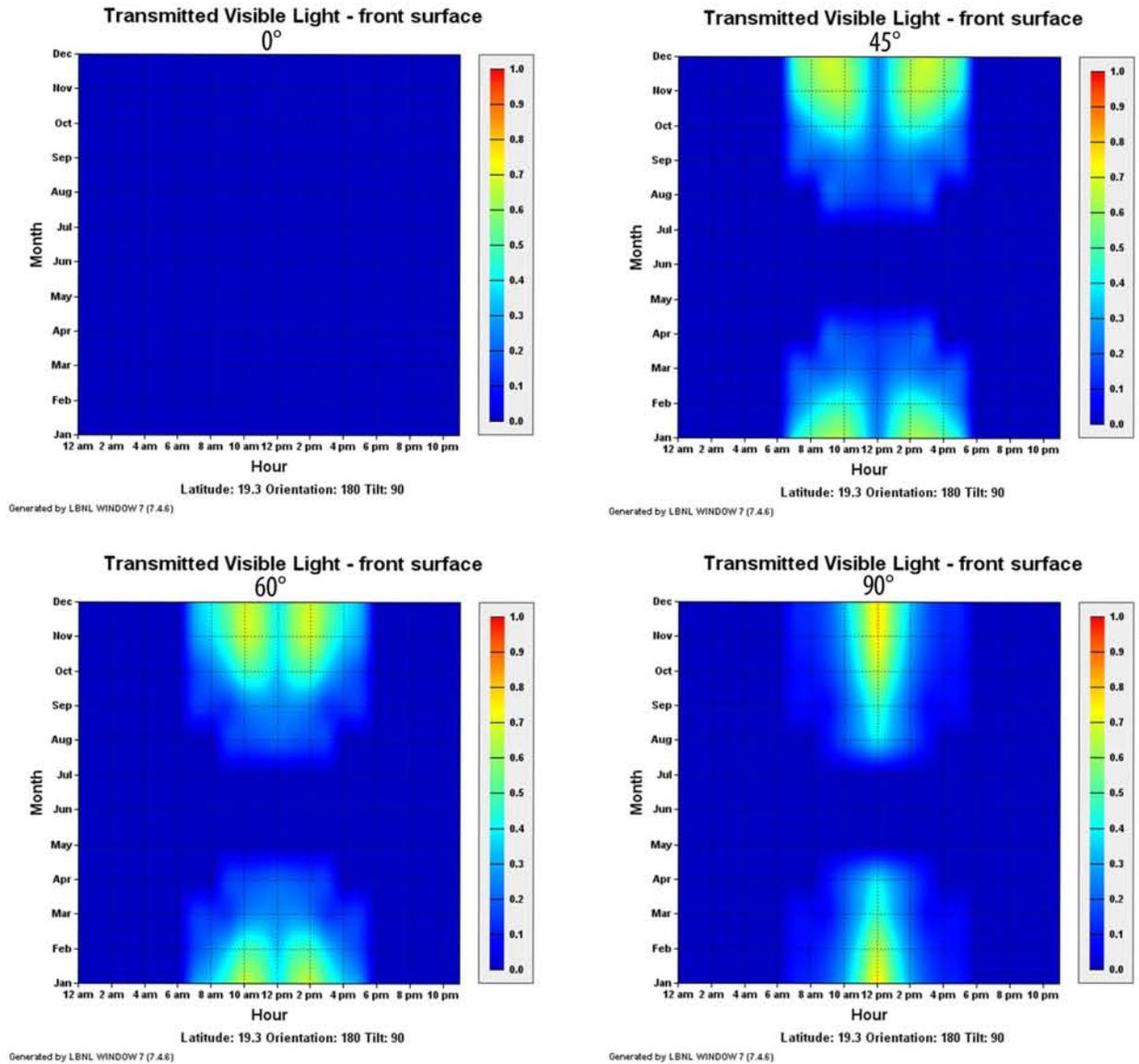


Figura 37. Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación sur

La transmisión de iluminación en el espectro visible, aumenta en la proximidad del solsticio de invierno.

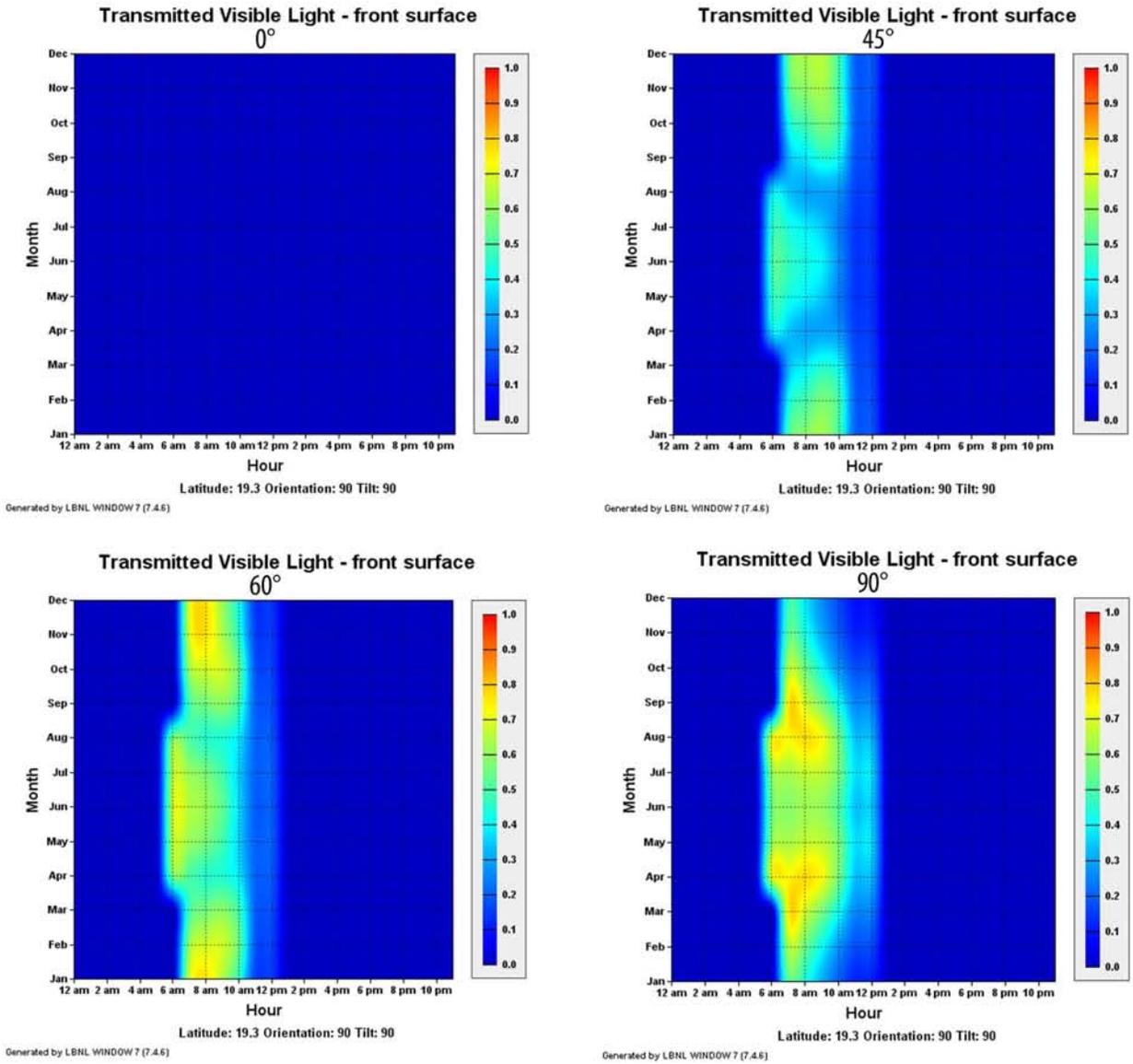


Figura 38. Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación este

Se observa el incremento de la transmisión de iluminación en el espectro visible durante el primer segmento dual del día.

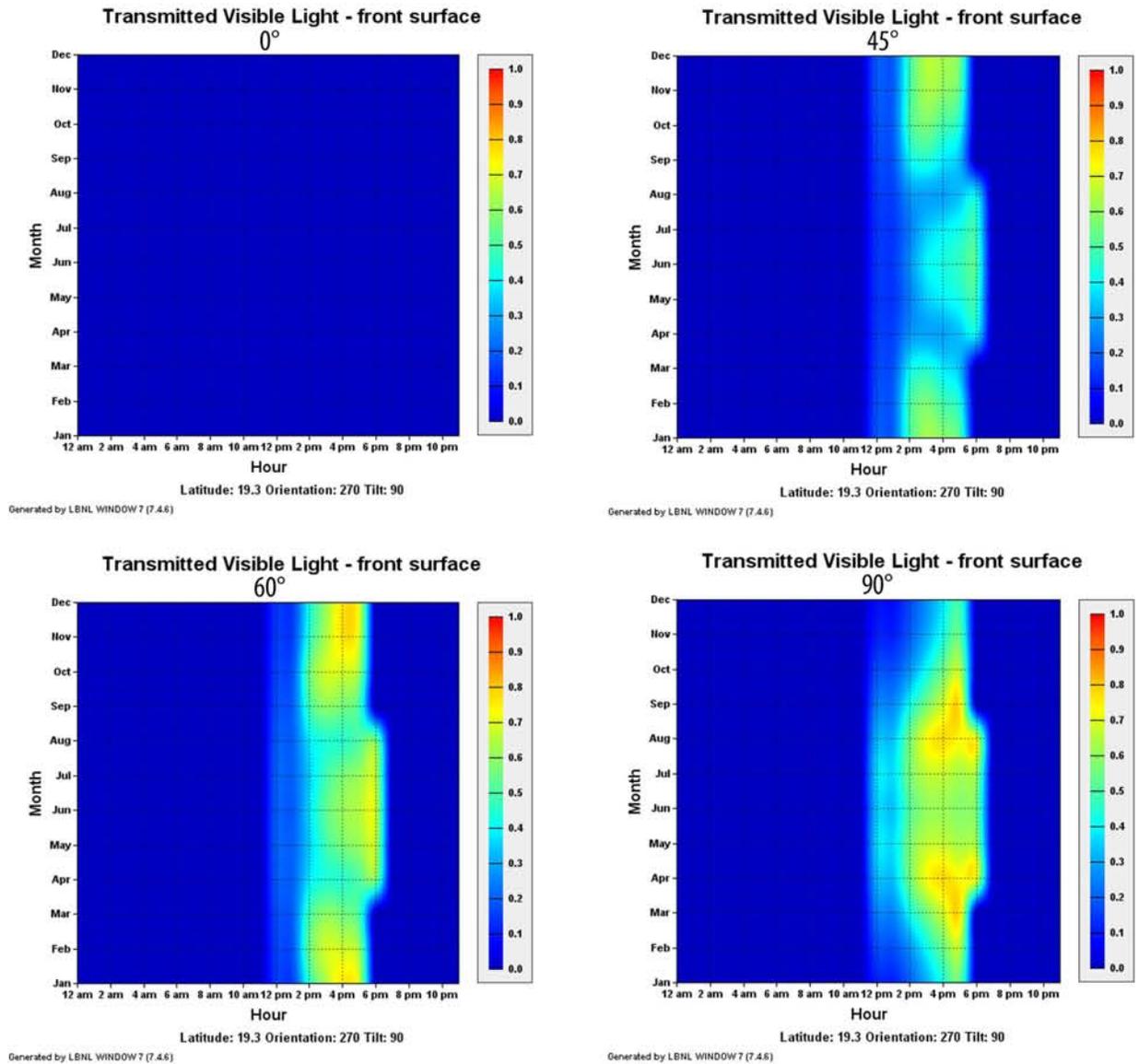


Figura 39. Transmisión de iluminación del espectro visible en la superficie frontal de la envolvente cinética, orientación oeste

Eventualmente, se puede optar por diversas estrategias de patrones de diseño, dependiendo de la relación del ángulo de apertura de la envolvente cinética, en relación a las condiciones de disponibilidad de la iluminación natural.

Análisis de insolación acumulativa

Se realizó el análisis de insolación acumulativa (*cumulative insolation*) mediante Autodesk® Revit® software. Se realizó el modelo del prototipo con las aberturas de las franjas de aerogel en cuatro distintos ángulos con la finalidad de analizar la geometría solar y su incidencia en una superficie en el interior del edificio de referencia en los dos equinoccios y en los dos solsticios del año 2016 en la Ciudad de México.

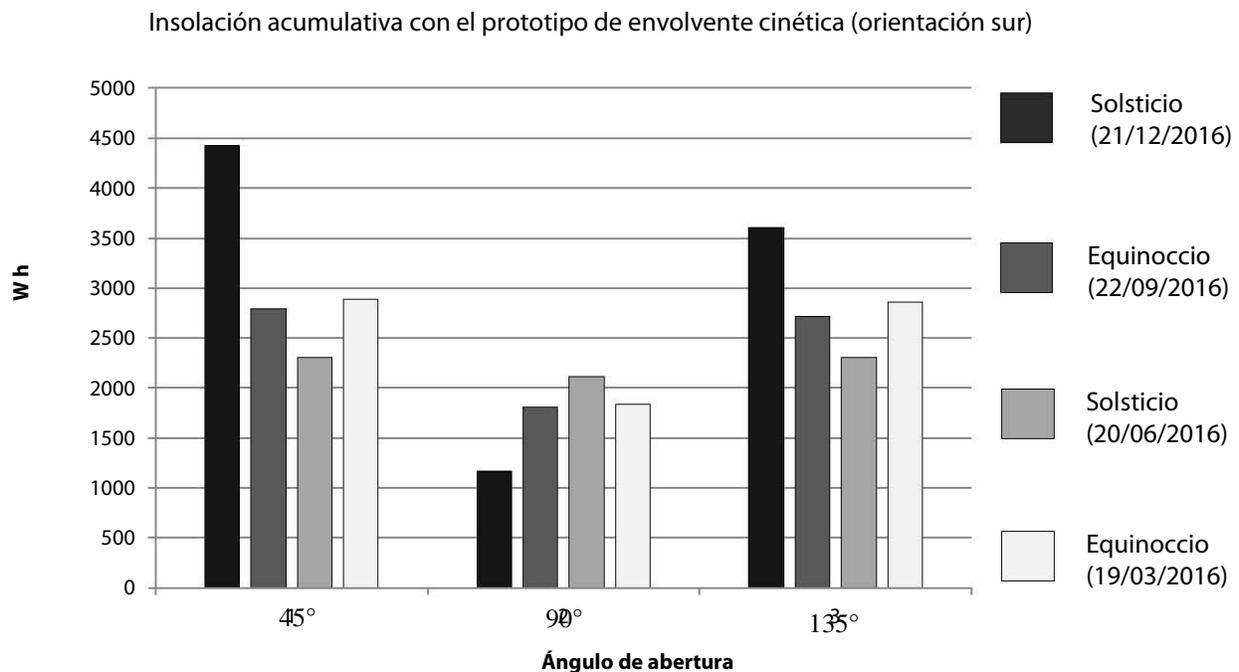


Figura 40. Promedio de la insolación acumulativa de la superficie interna con el despliegue de protección del prototipo en distintos ángulos respecto a su eje vertical, orientación sur

El análisis fue realizado mediante Autodesk® Revit® software con la función de *Solar Analysis*.

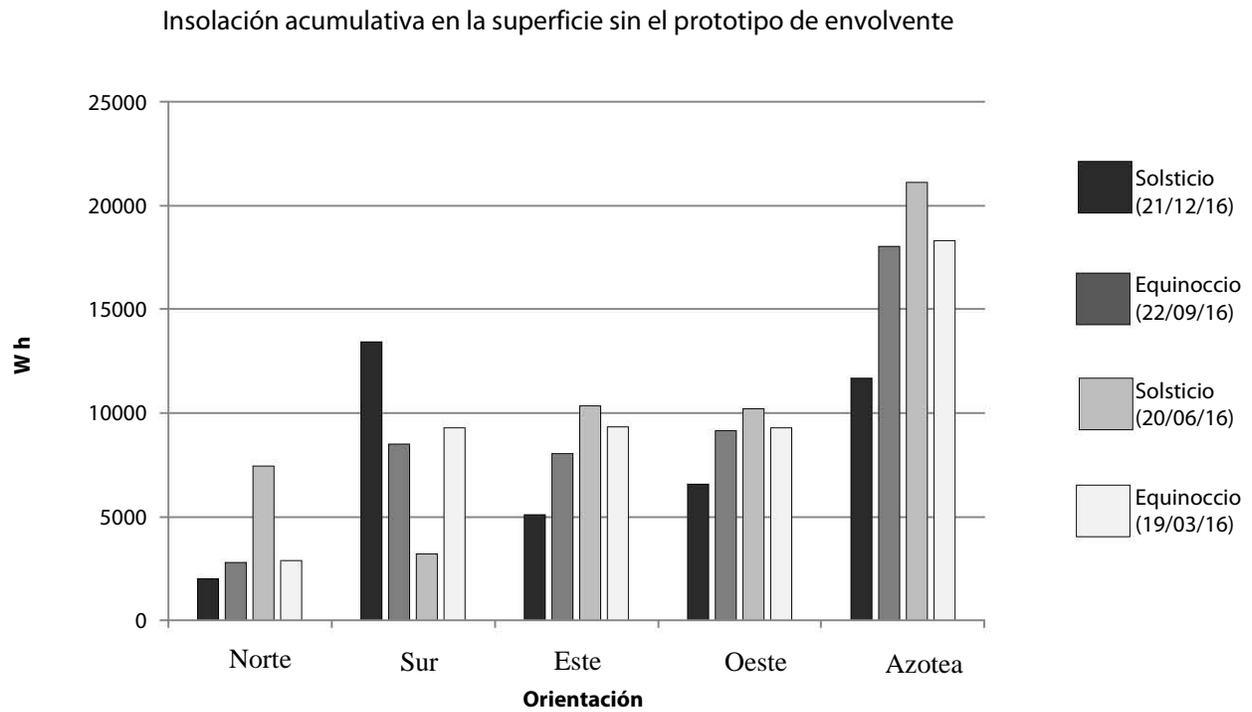


Figura 41. Promedio acumulativo de insolación de las superficies, sin el uso del prototipo, en distintas orientaciones. El análisis se realizó para los dos equinoccios y los dos solsticios del año 2016.

El análisis fue realizado mediante Autodesk® Revit® software con la función de *Solar Analysis*.

Análisis de iluminación natural

El análisis de iluminación natural fue realizado mediante Autodesk® 3ds Max® Design software, con la función de *Lighting Analysis*. El análisis se realizó para siete ángulos distintos, desde los 0° (cerrado) hasta los 90° de abertura. Los siete ángulos mencionados anteriormente corresponden al grado de abertura de las franjas de aerogel y los siete ángulos del movimiento de rotación del marco. El día seleccionado fue el 22 de septiembre a las 12:00 hrs. La latitud y longitud son de la Ciudad de México. Se consideró para el análisis dos modalidades de simulación, descritos a continuación: primero un día clasificado como *Overcast Sky* (10,000 lux) realizado para el movimiento de las franjas verticales y para el marco giratorio; segundo un día claro, es decir, tomando en consideración la iluminación directa y difusa. Los resultados de las simulaciones del día clasificado como *Overcast Sky* están representados en *Daylight Factor* (%) y los resultados de las simulaciones de un día claro, considerando la iluminación directa y difusa, están representados en *Total Illuminance* (lux). La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) realiza el análisis de iluminación natural en el equinoccio de Septiembre (22/09/2016) a las 12:00 hrs, debido a que se toma como referencia los lux de la bóveda celeste. A continuación se muestran los resultados de la sección longitudinal con los diversos ángulos de abertura de la envolvente cinética, en relación al *Daylight Factor* del espacio arquitectónico analizado:

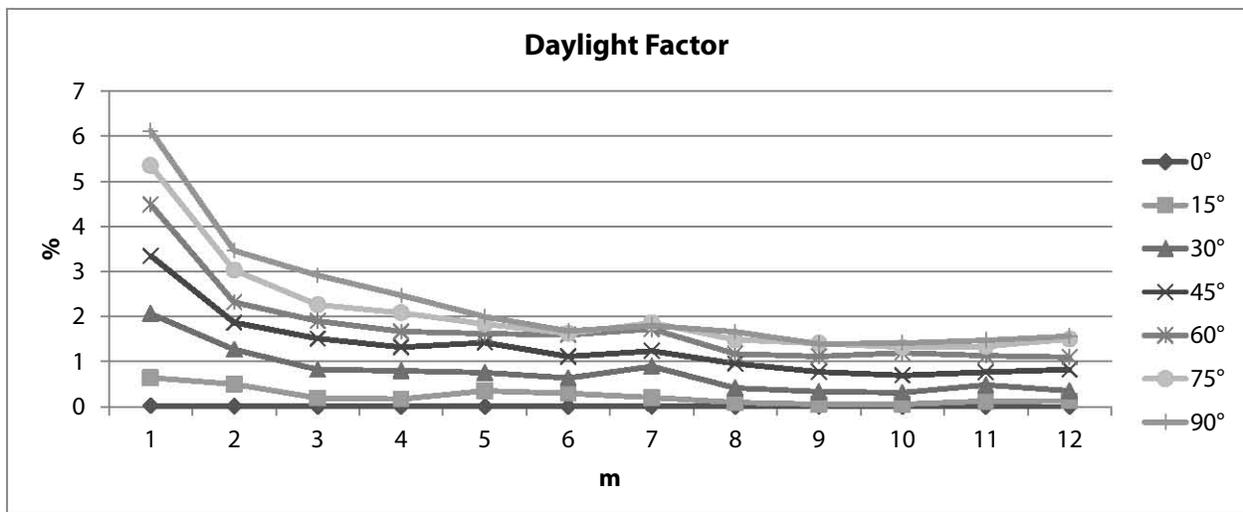


Figura 42. Daylight Factor del movimiento de las franjas de aerogel

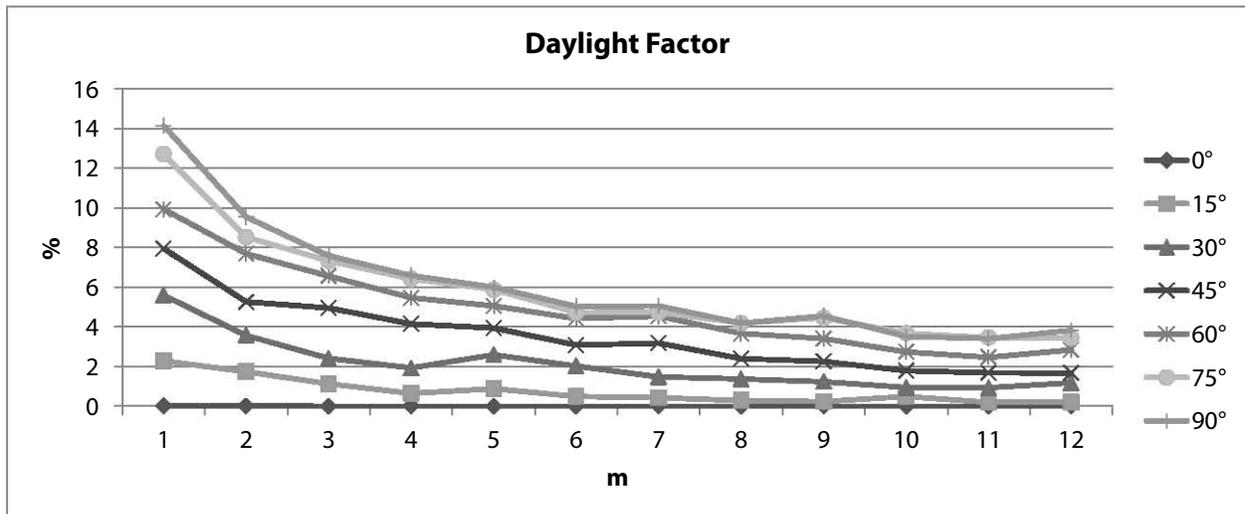


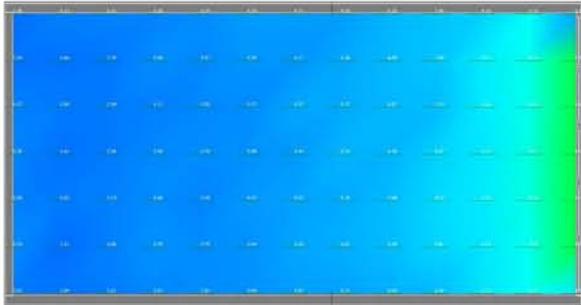
Figura 43. Daylight Factor del movimiento del marco

El análisis fue realizado mediante un paralelepípedo rectangular con una única cara expuesta a la iluminación natural, mediante la instalación de la envolvente cinética, con orientación sur. El día seleccionado fue el 22/09/2016, con un *Sky Model: CIE Overcast Sky*. Las aristas interiores del paralelepípedo rectangular son de 6m de ancho, 12m de fondo, y 2.5m de altura. Los muros tienen un espesor de 0.2m, con una referencia de *offset* externo de las aristas anteriormente descritas. La sección longitudinal está situada al centro del volumen.

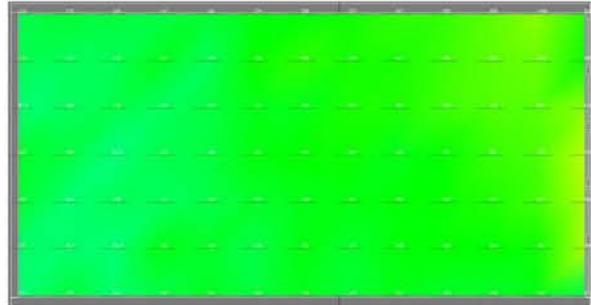
Las siguientes figuras de simulación de iluminación natural son de las superficies de análisis situadas a 0.8m de altura. Para la simulación se realizó una red de intersecciones, correspondientes a la delimitación de 1 m². Cada intersección está referenciado por un valor de lux. Las superficies del interior tienen una reflexión del 80%, asimismo, son de color blanco. Los parámetros de los materiales de la envolvente cinética son las relacionadas a cada material.

Figura 44. Simulaciones de iluminancia total en relación al ángulo de abertura de las franjas de la envolvente cinética

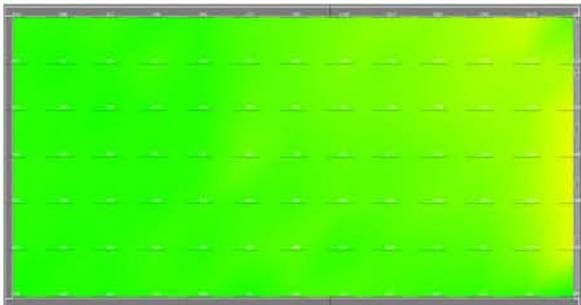
Ángulo de 0° (cerrado)



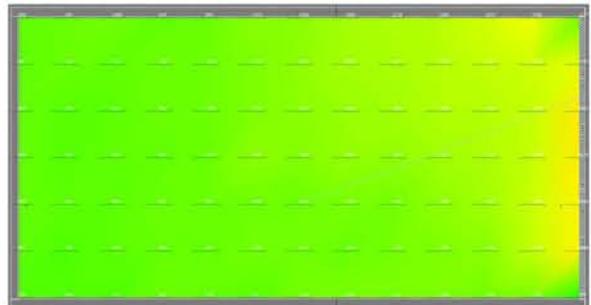
Ángulo de 15°



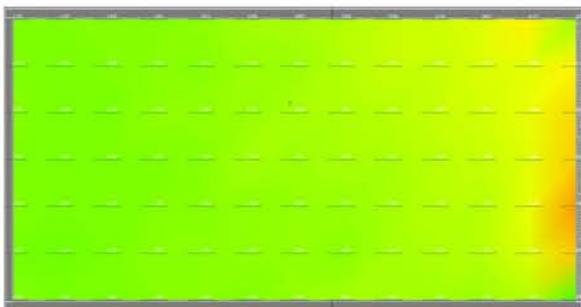
Ángulo de 30°



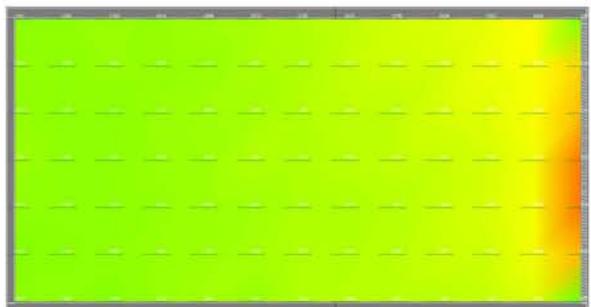
Ángulo de 45°



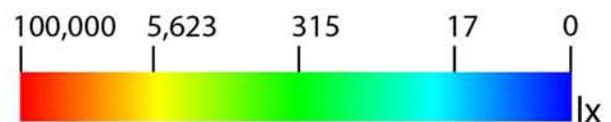
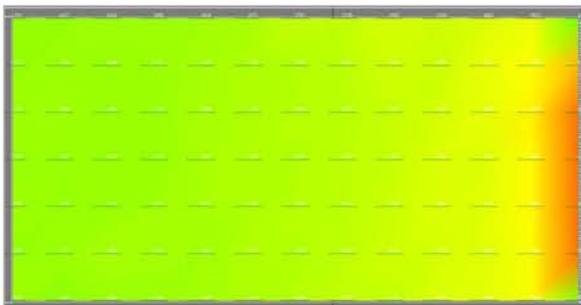
Ángulo de 60°



Ángulo de 75°



Ángulo de 90°

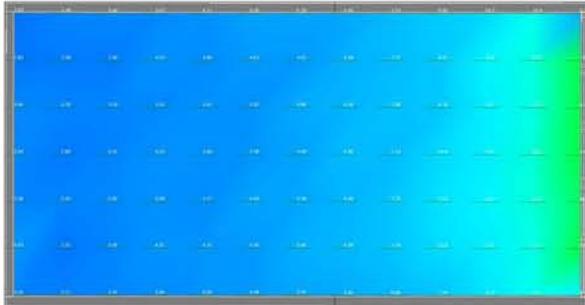


Escala logarítmica

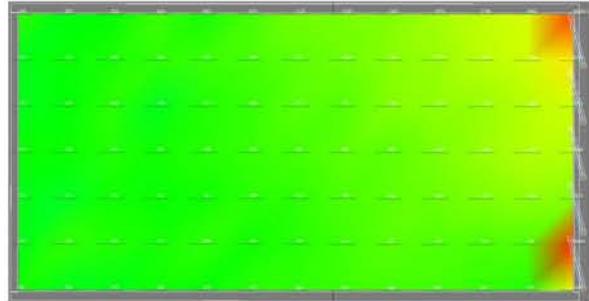
Las simulaciones fueron realizadas mediante Autodesk® 3ds Max® Design software con la función de *Lighting Analysis*.

Figura 45. Simulaciones de iluminancia total en relación al ángulo de abertura del marco de la envolvente cinética

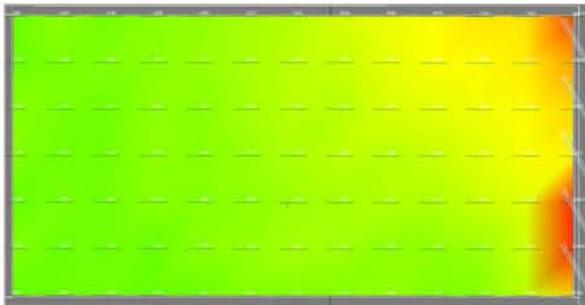
Ángulo de 0° (cerrado)



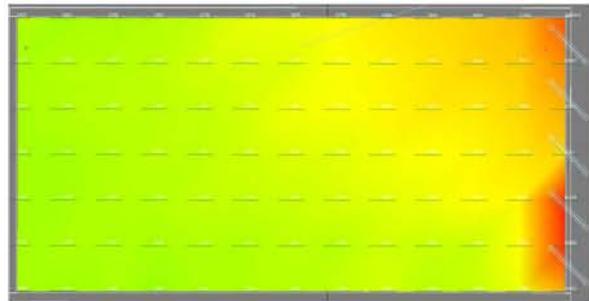
Ángulo de 15°



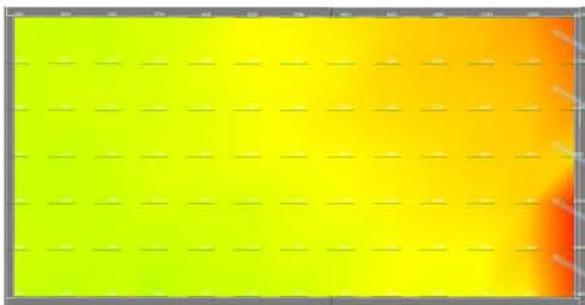
Ángulo de 30°



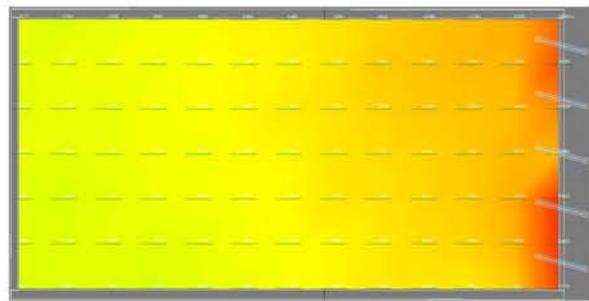
Ángulo de 45°



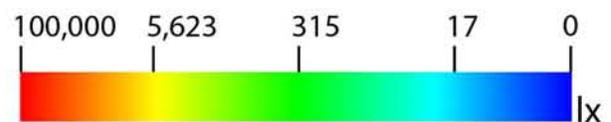
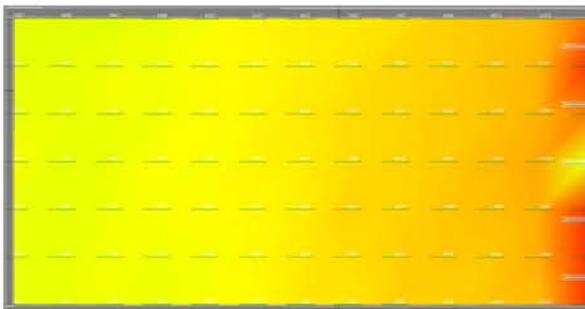
Ángulo de 60°



Ángulo de 75°



Ángulo de 90°



Escala logarítmica

Las simulaciones fueron realizadas mediante Autodesk® 3ds Max® Design software con la función de *Lighting Analysis*.

En las simulaciones anteriores se puede observar la afectación en las condiciones de iluminación natural al interior del edificio, en relación al ángulo de abertura de la envolvente, en sus distintas modalidades de giro. A continuación se muestran las gráficas de la sección longitudinal de las simulaciones de las figuras 44 y 45:

Figura 46. Iluminancia total del movimiento de las franjas en distintos ángulos de abertura

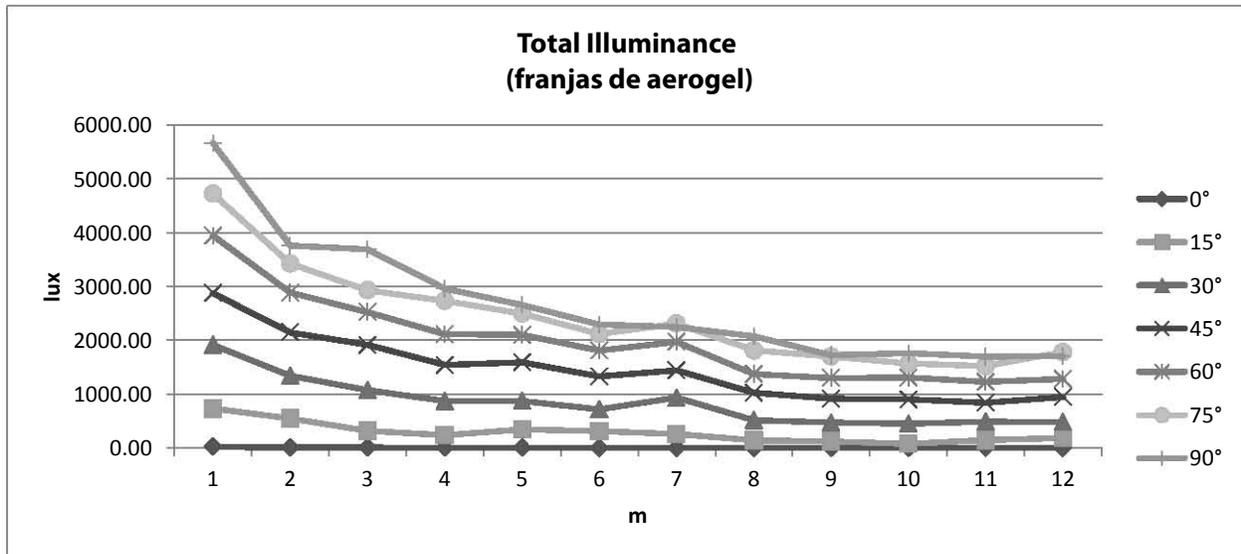


Figura 47. Iluminancia total del movimiento del marco en distintos ángulos de abertura

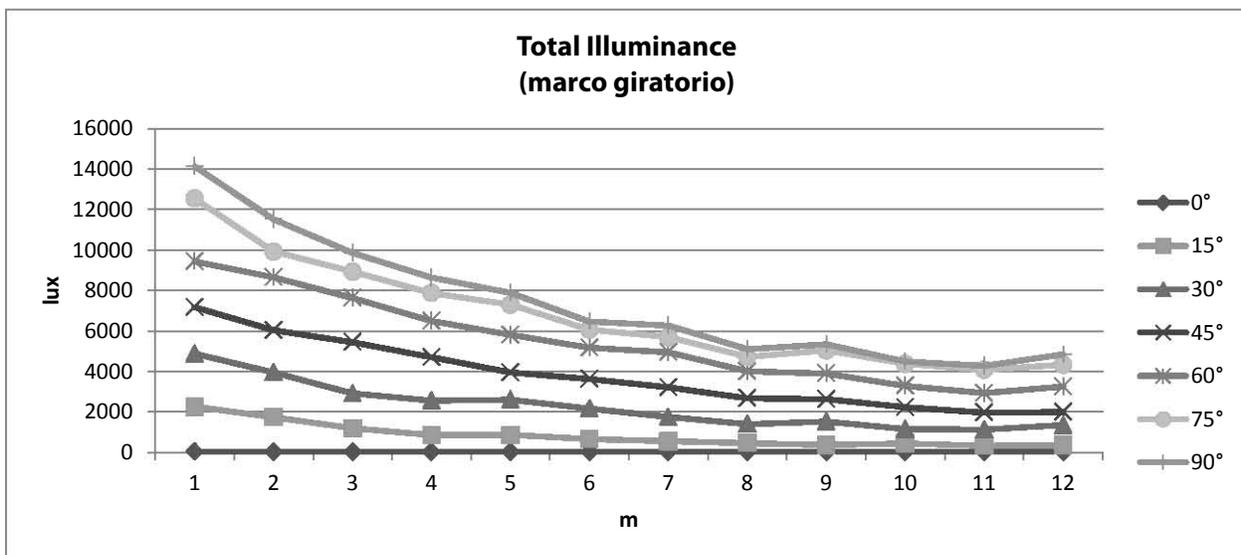
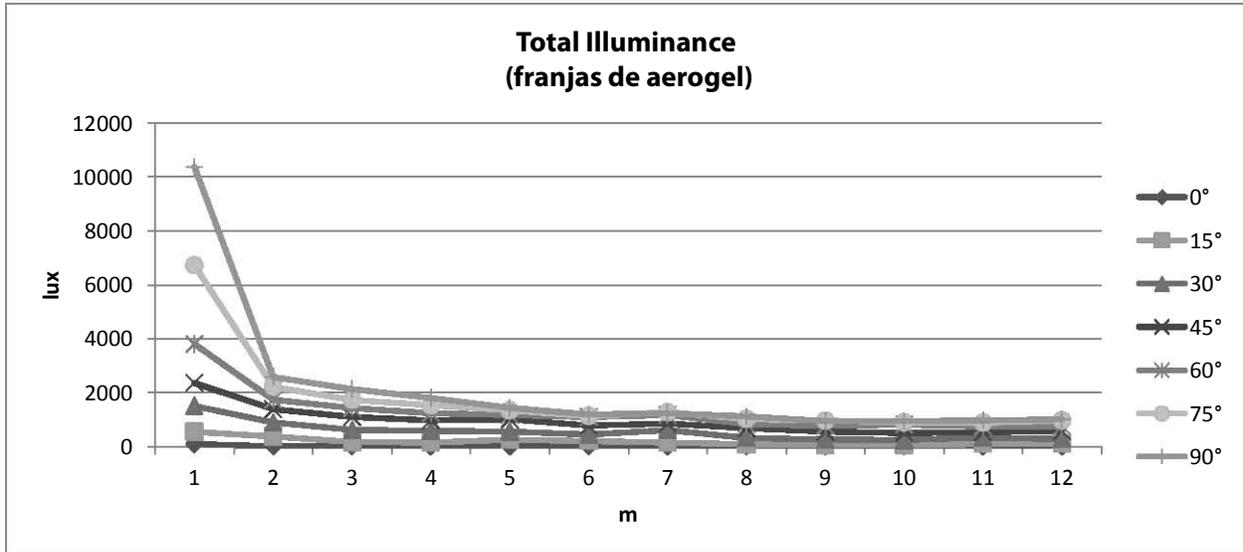


Figura 48. Iluminancia total del movimiento de las franjas en distintos ángulos para el solsticio de diciembre



Se puede observar en las figuras 46, 47 y 48 la relación de afectación en la distribución de la iluminancia total en una sección longitudinal. Los distintos ángulos de abertura tienen diversos grados de permisibilidad de iluminación natural: posibilitando el aprovechamiento de la disponibilidad de la iluminación natural en conjunción con la variabilidad durante el transcurso del día y periodos del año.

Análisis de la ventilación natural

El análisis de ventilación natural tiene como finalidad identificar las afectaciones al interior del edificio respecto a la dirección e intensidad del viento, en relación al ángulo de apertura del prototipo de envolvente cinética. También, es de interés mostrar las posibilidades de flujos de viento generados al interior de un espacio de referencia, con la envolvente cinética. Las simulaciones se realizaron mediante SOLIDWORKS® 3D CAD software con la funcionalidad de *Flow Simulation*. Las condiciones ambientales de simulación son las siguientes:

Parámetros termodinámicos

Presión estática: 102500.0 Pa.

Temperatura: 293.2 K.

Parámetros de velocidad:

Velocidad: 3.57 m/s.

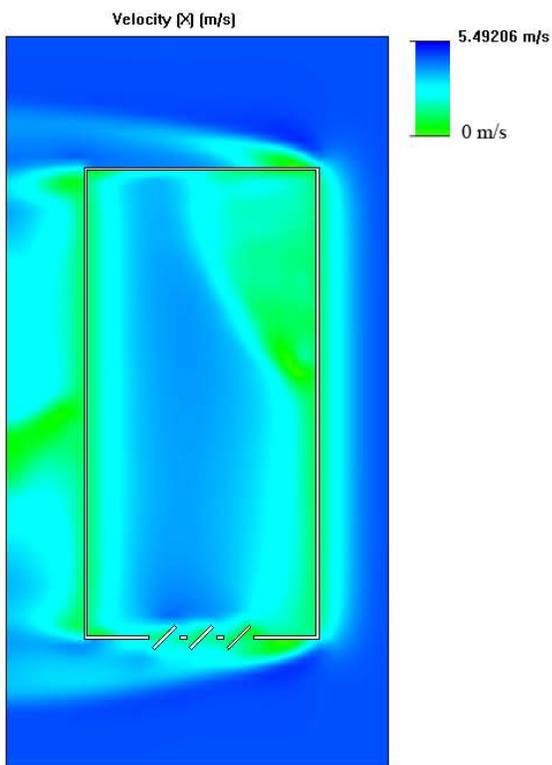


Figura 49. Velocidad de 3.57 m/s en el eje X

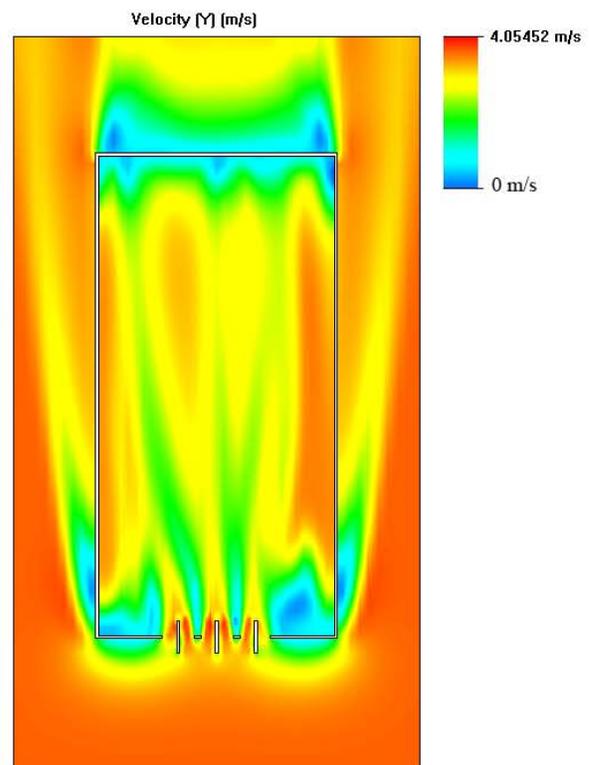


Figura 50. Velocidad de 3.57 m/s en el eje Y

En la figura 49 se puede observar la influencia que tiene el borde de la delimitación del caso de estudio, incrementando la velocidad del viento en los bordes y disminuyendo la velocidad del viento en las cercanías del prototipo. En el caso de la figura 50 se puede observar el efecto Venturi en el interior del edificio, se puede observar la influencia del ángulo del prototipo en el flujo del viento hacia el interior.

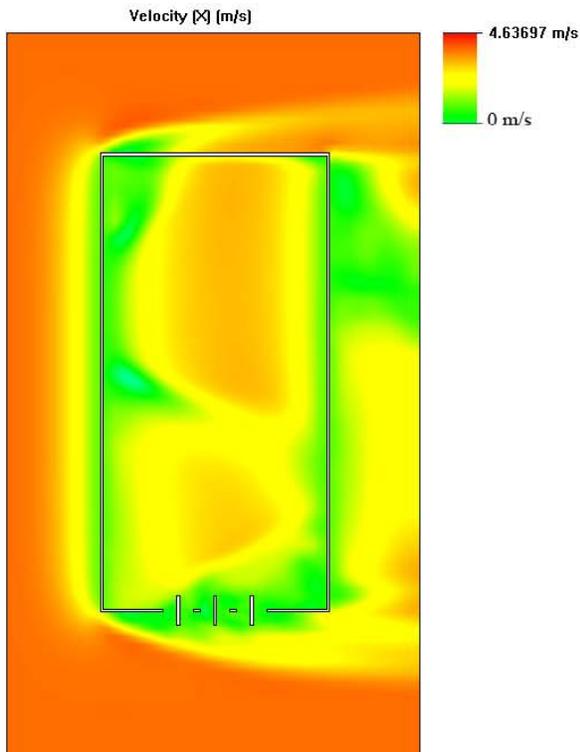


Figura 51. Velocidad de 3.57 m/s en el eje X con un ángulo de abertura de 90°

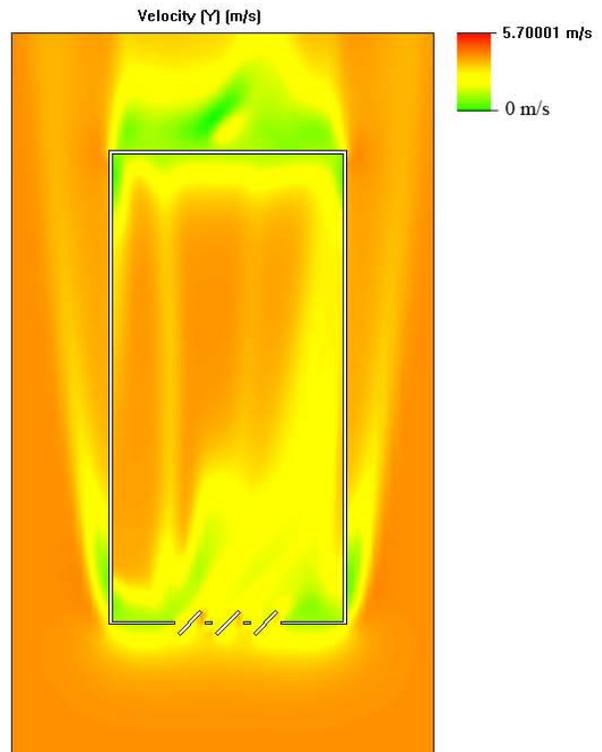


Figura 52. Velocidad de 3.57 m/s en el eje Y con un ángulo de abertura de 45°

En la figura 51 se pueden observar similitudes con la figura 49, respecto a la afectación del borde de la delimitación del caso de estudio, incrementando la velocidad del viento en los bordes y disminuyendo la velocidad del viento en las cercanías del prototipo.

En la figura 52 la dirección del viento en el eje Y tiene influencia en el flujo del viento hacia el interior del edificio en relación al ángulo del prototipo. Mediante el ángulo del prototipo se pueden emplear diversas estrategias para manipular las condiciones del interior del edificio cuando se requiera de dirigir el viento hacia zonas específicas.

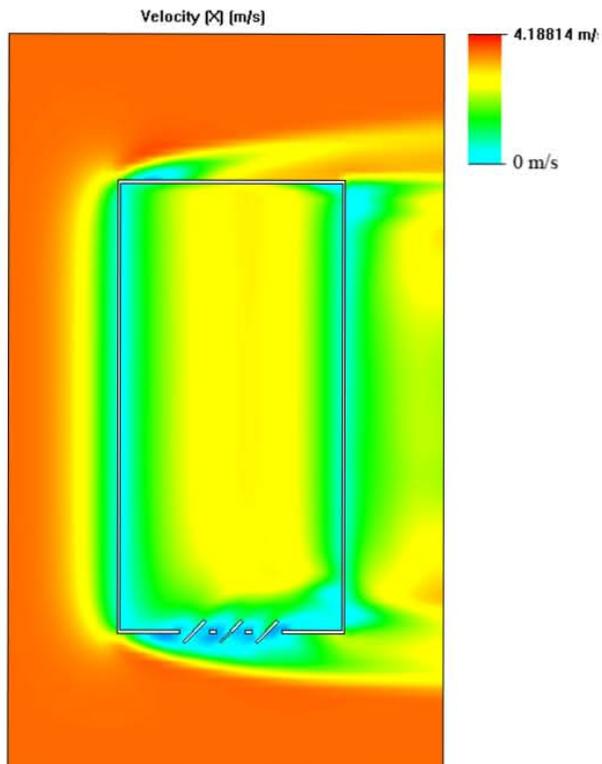


Figura 53. Velocidad de 3.57 m/s en el eje X con un ángulo de abertura de 45°

En la figura 53 se puede observar la posibilidad de crear espacios de baja presión en la zona de instalación de la envolvente cinética, con la finalidad de extraer el aire del edificio cuando se requiera.

5.7

Análisis de los resultados del prototipo en físico

El desarrollo del prototipo en físico permitió poner a prueba cuatro subconjuntos del conjunto principal (envolvente cinética). Los cuatro subconjuntos son: primero las fuentes de *input*, segundo el procesamiento de los datos, tercero el *output* en conjunción con los actuadores y cuarto la autonomía energética del sistema. Cada subconjunto implicó incorporar software, hardware, materiales emergentes, sensores, el diseño de un módulo experimental y la fuente de suministro energético autónomo.

La incorporación de sensores de luminosidad, temperatura y humedad relativa, colocados al interior y al exterior del módulo experimental, permitió la obtención de datos de *input* al sistema de operación autónomo. El sistema de operación autónomo, realizado mediante el microcontrolador Arduino® y el software *Integrated Development Environment* (IDE), permitió el procesamiento y obtención de resultados (*outputs*) derivados de un procesamiento por medio de algoritmos. Los *outputs* obtenidos corresponden a parámetros de accionamiento, ejecutados mediante los actuadores. Por lo tanto, cada acción está en estrecho vínculo con los datos procesados de forma autónoma.

A continuación se muestran los resultados de las mediciones del prototipo en físico, acoplado a un módulo de aislamiento. En la figura 54, se puede observar la relación entre el ángulo de abertura de la envolvente cinética en relación a las mediciones de iluminación natural.

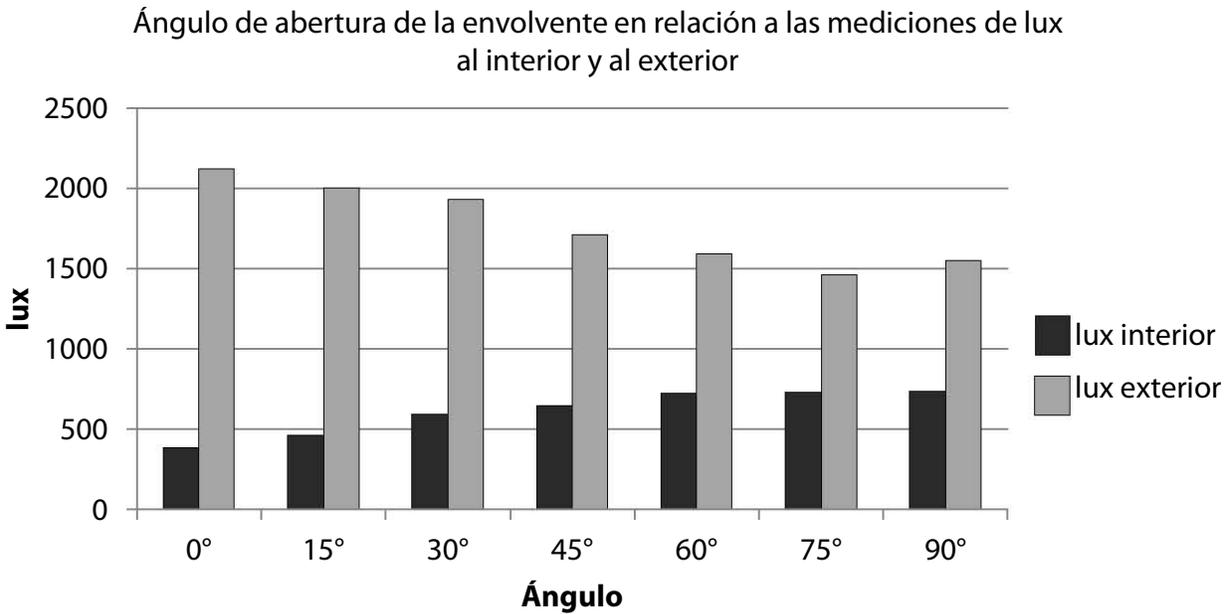


Figura 54. Ángulo de abertura de la envolvente en relación a las mediciones de iluminación natural al interior y al exterior del módulo experimental

En la figura 54 se puede observar el incremento de la iluminación medida en relación al ángulo de abertura. Mediante los diversos ángulos de abertura se puede optar por diversas estrategias, utilizando el recurso del medio ambiente como medio de acción de cambio moderado o transversal.

En la figura 55, también se realizaron las mediciones de lux. Se colocaron dos sensores de iluminación; uno al interior y otro al exterior. Sin embargo, como fuente de iluminación se utilizó una fuente artificial. En la figura 55 se puede observar el incremento en las mediciones registradas al exterior del módulo experimental, en mayor medida en el ángulo de 0° y disminuyendo paulatinamente. Esto es debido a la reflexión espectral acromática y el ángulo de reflexión de las franjas verticales de la envolvente y la consecuente incidencia en el sensor.

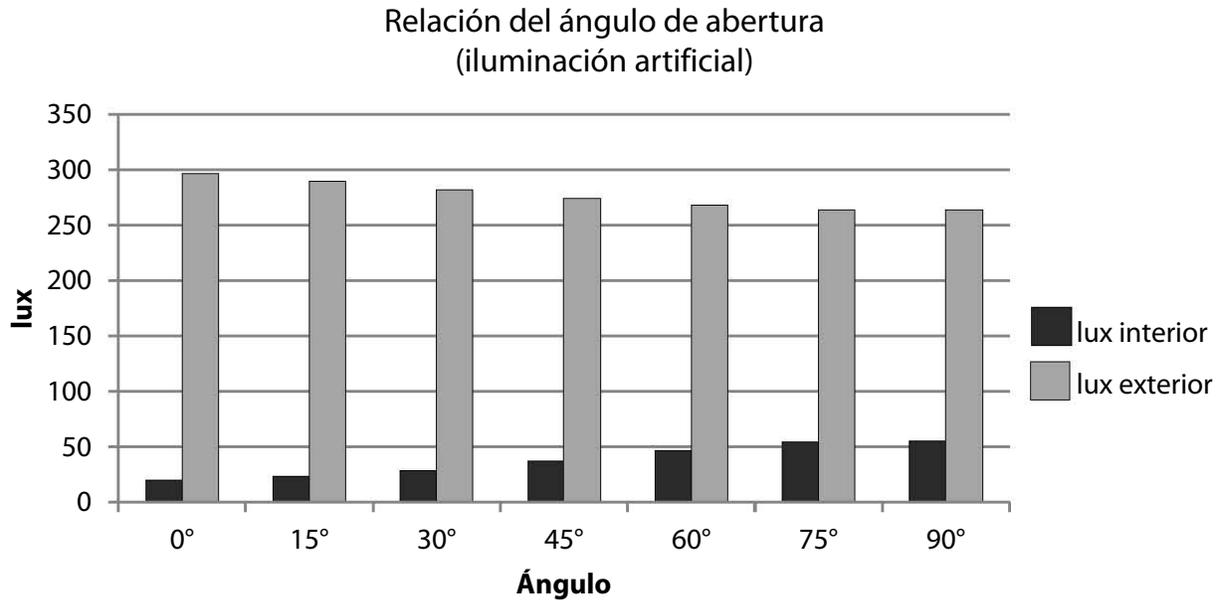


Figura 55. Relación del ángulo de abertura con una fuente de iluminación artificial directa

Los registros de temperatura y humedad se llevaron a cabo en dos módulos experimentales: el primero con el prototipo de envolvente cinética instalado y el segundo solamente utilizado como módulo de referencia, es decir, sin el prototipo de envolvente cinética. Mediante los registros de los sensores colocados al interior y exterior de los módulos experimentales se pudo identificar la eficiencia del aerogel instalado en el prototipo como aislamiento. Asimismo, los diversos ángulos tienen una relación con las condiciones deseadas al interior de un espacio delimitado, relacionados con los algoritmos del procesamiento de los datos de manera autónoma.

5.8

Discusión de resultados

La propuesta de envolvente cinética desarrollada consistió en generar una gama estructurada de posibles funciones derivadas de la condición de cambiar o modificar la forma en relación a distintos intervalos de tiempo. Es decir, considerar el cambio y la relación con los datos introducidos, procesados y/o resultantes. En primera instancia, la selección de la forma adecuada, jerarquizada por la diversidad de funciones y su practicidad: fueron algunas de las determinantes para seleccionar una de las formas desarrolladas. Asimismo, la factibilidad, recursos y consideración del tiempo para desarrollar un determinado prototipo. Una vez seleccionado el prototipo, es decir, la forma y sus principales fases de movimientos o los más representativos, se procedió a delimitar la gama de funciones en relación a las siguientes características: las condiciones de desempeño térmico, iluminación natural, ventilación natural, patrones de diseño, autonomía operativa y energética, la diversidad de proporciones, la posibilidad de ubicación y orientación en el edificio, entre otras variables. Mediante las distintas simulaciones se pudo obtener una gama de posibilidades ante determinadas características del medio ambiente y la relación deseada con las condiciones en el interior del edificio. Debido a las diversas condiciones posibles del medio ambiente, se determinaron algunas fases principales de movimiento de la envolvente cinética y la relación con cada una de las simulaciones llevadas a cabo.

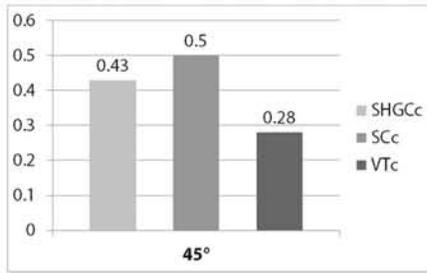
La simulaciones del desempeño térmico de la envolvente cinética realizada mediante Berkeley Lab Window v7.4.6.0 *Glazing System Thermal and Optical Properties*, permitió introducir las especificaciones de cada una de las capas y su posterior resultado en relación a los ángulos de abertura. Cabe destacar el rango de actuación, de la envolvente cinética, en relación al Coeficiente de Sombreado, Coeficiente de Ganancia de Calor Solar, Transmitancia Visible, y Valor-U, descrito en la figura 31. Cada ángulo analizado en las simulaciones de desempeño térmico tiene una relación de desempeño aproximado en el interior del edificio. Consiguientemente, se puede designar la implementación de estrategias en relación cuantitativa con el medio ambiente. Aunado a la delimitación de la estrategia a optar durante el día o periodo del año, pueden favorecer significativamente el desempeño térmico al interior del edificio. Considerando la regularidad de las condiciones deseadas en compatibilidad con la variabilidad del medio ambiente.

Las simulaciones de iluminación natural, realizadas mediante Autodesk® 3ds Max® Design software con la función de *Lighting Analysis*: delimitaron las funciones de algunas modalidades de abertura en relación a las características obtenidas al interior del edificio. Las simulaciones representadas en *Daylight Factor* e Iluminancia Total, figuras 42 a 48, convergen en una gama de posibilidades para regular la iluminación al interior del edificio en relación al ángulo de abertura de la envolvente. Considerando las características cinéticas, es posible especificar el ángulo en relación a la calidad de iluminación deseada al interior del edificio. Fundamentando los cambios generados mediante la envolvente cinética, relacionados a las características de disponibilidad de la iluminación natural. Asimismo, la posibilidad de re-direccionar la iluminación natural hacia zonas con un índice de iluminación natural bajo. Mejorando la distribución de la iluminación natural al interior del edificio, en relación a otras variables.

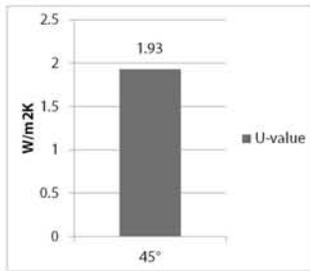
Las simulaciones de ventilación natural realizadas mediante SOLIDWORKS® 3D CAD software con la función de *Flow Simulation*, ejemplifican las posibilidades de modificar los flujos de ventilación natural e inclusive la posibilidad de utilizar zonas de baja presión para extraer aire caliente del edificio, figuras 49 a 53. Debido a las diversas proporciones de la envolvente cinética, al igual que de las diversas ubicaciones en el edificio y su respectiva orientación, las estrategias del aprovechamiento de la ventilación natural amplían la gama de funciones de la envolvente cinética. Aunado a la posibilidad de reacción del sistema para generar cambios relativamente instantáneos, aprovechando la disponibilidad, dirección, intensidad y flujos, durante el transcurso del día. Asimismo, es importante destacar que en algunas situaciones pueden emplearse un número reducido de módulos cinéticos ubicados en zonas estratégicas del edificio.

A continuación se presenta de manera ilustrativa la relación de un ángulo de abertura de 45° de la envolvente cinética, en relación a algunas de las simulaciones generadas y su respectivo desempeño.

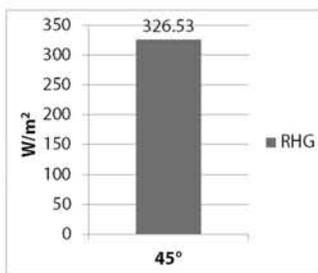
Glazing System



Valor-U

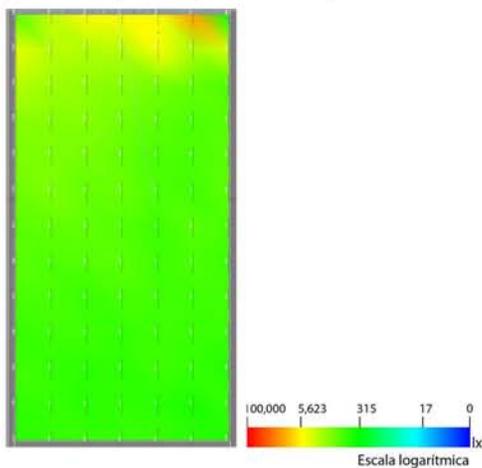


Ganancia Relativa de Calor

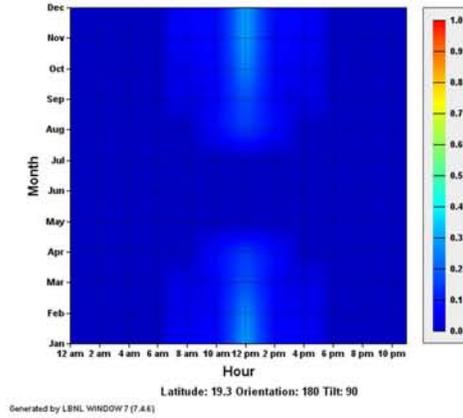


Iluminancia Total

(Diciembre 21, 12:00 hrs, orientación sur)



Transmisión del espectro visible (orientación sur)

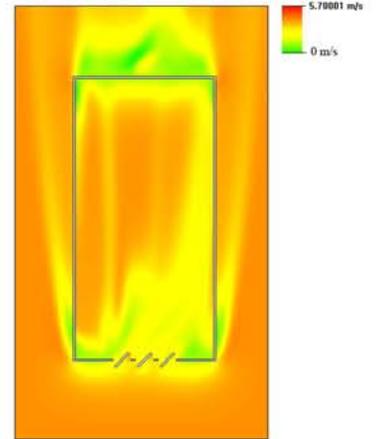


Ángulo de apertura de 45°

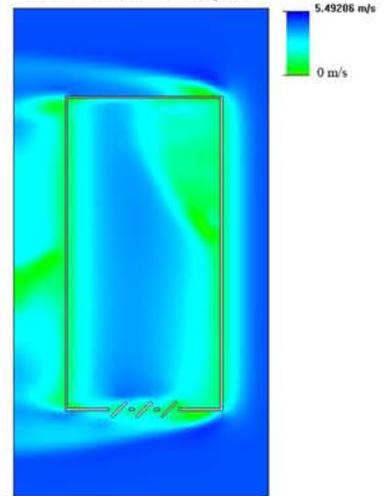
Ciudad de México



Velocidad de 3.57 m/s (eje Y)



Velocidad de 3.57 m/s (eje X)



Velocidad de 3.57 m/s (eje X)

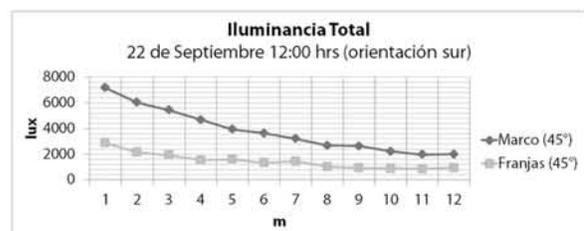
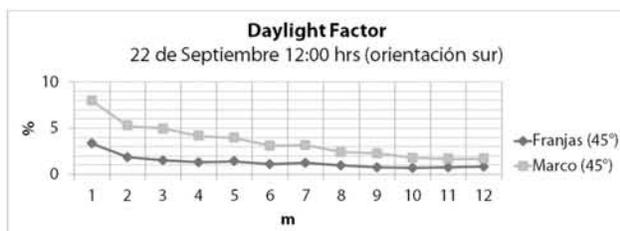
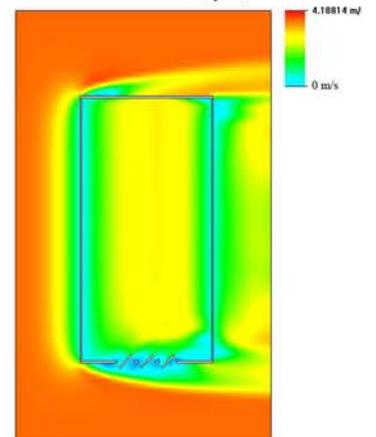


Figura 56. Ángulo de apertura de 45° en relación con las simulaciones

Por lo tanto, como se puede observar en las simulaciones mencionadas anteriormente, se tiene a disposición de rangos de actuación factibles de regular a manera de un filtro selectivo de variables en relación a las condiciones cinéticas de la envolvente. La implementación del sistema cinético, subdividido en: las fuentes de inputs, el procesamiento de los datos, el o los resultados, el ciclo de retroalimentación, la autonomía energética y operativa, son algunas características de la envolvente cinética. El prototipo en físico incorpora de manera general las características del sistema cinético. La utilidad del microcontrolador Arduino® con las distintas tarjetas acoplables, aunado al software IDE, facilitaron la incorporación de sensores y el procesamiento de los datos para obtener configuraciones transferidas a condiciones cinéticas de la forma en relación al cambio entre contextos externos al sistema. La interconexión de datos representada a través de una manifestación momentánea del despliegue de una forma o patrón, generada de manera autónoma con recursos energéticos autónomos. El uso primordialmente de la variabilidad del medio ambiente, para la reducción del gasto energético del edificio. Utilizando los sistemas activos de mayor gasto energético para auxiliar en determinados periodos cuando se requiera de complementar al sistema de permisibilidad selectiva.

Una de las varias transiciones del sistema cinético, en otras modalidades de la forma arquitectónica, pueden coexistir en la singularidad de la expresión de un diseño avanzado imperado por datos “incorporados” en la justificación y razón de la forma ante condiciones específicas de cambio. Es decir, la posibilidad de configurar la materia para un contexto con conjuntos de variables jerarquizadas para cada sitio a la cual la obra arquitectónica transfiera su forma ideal.

Mediante el microcontrolador Arduino® se incorporó en el prototipo de envolvente cinética fuentes de inputs al exterior e interior, diferenciando a la envolvente cinética como el médium o filtro. Es posible reducir la versión del prototipo a un componente de dimensiones menores, ocupando el espacio de un nodo con capacidades de generar movimientos en los ejes bidimensionales o tridimensionales de la envolvente cinética. Es conveniente adoptar un sistema con componentes ligeros de aerogel interconectados en una red triangular capaz de adaptarse a superficies curvas. Asimismo, considerando la interconexión mediante la transferencia de datos por nodos con una jerarquía de redes con puntos convergentes, generando el control autónomo por zonas interrelacionadas y de autonomía energética.

Conclusiones y prospectivas

El desarrollo de un prototipo de envolvente cinética implicó establecer vínculos entre distintos segmentos y la interrelación del avance tecnológico en un sistema cinético en común, entre los cuales se destacan: los materiales emergentes, las fuentes de *inputs*, el procesamiento de los datos, las fuentes de *outputs*, la retroalimentación del funcionamiento del sistema cinético, la autonomía del sistema, la interacción de herramientas digitales y el desarrollo de conceptos para el prototipo cinético, entre otros temas derivados. Una de las generalidades del desarrollo de un sistema cinético, derivado en una envolvente cinética, involucró vincular de cierto modo el mundo físico con el mundo digital. Una de las ventajas significativas de vincular lo material con lo inmaterial es el potencial de aplicación en el diseño arquitectónico, generando en ocasiones modelos innovadores. En consecuencia el desarrollo de un prototipo de envolvente cinética no es solamente el desarrollo de un objeto aislado. En cambio, el desarrollo de un prototipo de envolvente cinética comprendió vincular, interrelacionar y establecer una constante búsqueda de síntesis de conceptos y aplicaciones factibles de aplicarse.

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de la envolvente cinética representado a manera de síntesis en un prototipo, de los aspectos más significativos por el rol que desempeña en el sistema cinético, está compuesto por varios conjuntos tecnológicos. A continuación se describen los conjuntos tecnológicos involucrados en el desarrollo de la envolvente cinética.

La selección del material adecuado para la envolvente, es un componente clave para establecer la modalidad de un filtro selectivo entre dos o más contextos distintos. Algunos de los aspectos claves del material a incorporar en la envolvente cinética son las siguientes características: un buen aislamiento térmico, un buen aislamiento acústico, ligero, con un avance tecnológico considerable para incorporarlo a una aplicación arquitectónica, no inflamable, configurable en relación a las características de translucidez, reproducible en distintas formas, resistente, entre otras características. La selección del aerogel como el material principal a utilizar en la envolvente cinética cumplió con la gran mayoría de los requisitos descritos. Las distintas formas del aerogel con las respectivas variaciones, brindaron de un material flexible para incorporar

a la envolvente cinética. Adicionalmente, la factibilidad de adquirir el aerogel en las diversas modalidades de formas y características, seleccionando la más adecuada para el prototipo desarrollado. La amplia gama de posibilidades de aplicación del aerogel en la arquitectura, posiblemente aumenten en las siguientes décadas. Aunado a las distintas aplicaciones en otros objetos de uso cotidiano.

Ahora bien, el sistema de envolvente cinética, en términos generales está compuesto de una fuente de *inputs*, el procesamiento de los datos, la fuente de *outputs* y la retroalimentación de la eficiencia de las acciones. La fuente de *inputs*, es decir los datos que son introducidos al sistema, proveen de recursos para el correcto funcionamiento del sistema: vinculándolo con uno o varios contextos representativos de una determinada situación. Uno de los vínculos directos entre lo tangible e intangible, en primera instancia, son los *inputs*. Para el desarrollo del prototipo se optó por sensores con funciones prácticas para acoplarse a Arduino[®]. La flexibilidad para optar por distintos sensores de: temperatura, humedad, iluminación, viento, distancia, flexión, entre otras fuentes de *inputs*; permitieron ejecutar e incorporar funciones a la envolvente cinética con mayor facilidad y ajuste a los recursos disponibles.

El procesamiento de los datos es otro de los segmentos del sistema cinético de gran importancia. Los algoritmos fueron utilizados prioritariamente para determinar a manera de una interface selectiva, aquellas situaciones vinculables a una determinada gama de acciones de la envolvente cinética. El modo de operar de la envolvente, en gran medida, está determinado por las capacidades de configuración de las estrategias a emplear mediante la envolvente cinética. Es decir, las variaciones durante el transcurso del día y los diversos periodos del año, pueden ser utilizados como recurso aprovechable para generar las condiciones deseables al interior del edificio. Además del interés en lograr una buena eficiencia energética mediante la envolvente cinética en el edificio, también puede ser aprovechado para determinar las modalidades de cosecha de energía renovable. En consecuencia, el adecuado diseño del procesamiento de los datos y el posible vínculo con otras herramientas digitales: coexisten en potencializar y precisar soluciones con un mayor rango de previsión y exactitud. Posiblemente en el futuro los sistemas estén dotados con características de inteligencia artificial, en contraste a un estímulo-respuesta.

El *output*, es decir, el o los resultados transferidos a acciones tangibles o a vínculos digitales: son un recurso eficaz de conexión entre lo inmaterial y material. El vínculo de la forma arquitectónica interconectada con otros parámetros de contextos naturales y artificiales: potencializan el diseño arquitectónico. No es una cuestión de imponer una importancia a los objetos

arquitectónicos exclusivamente por las capacidades de movilidad, en cambio, es una cuestión de vínculos con datos enfocados a una inteligencia con bienes colectivos. Probablemente la envolvente arquitectónica sea uno de los segmentos del edificio de especial interés para experimentar algunas de las características cinéticas. Las fuentes de *output* interconectados a la forma arquitectónica pueden contribuir significativamente a considerar con mayor precisión soluciones a parámetros cuantitativos y cualitativos. Mediante el desarrollo del prototipo de envolvente cinética, el *output* fue transferido a acciones de cambio de disposición espacial utilizando los componentes móviles. Sin embargo, las acciones pueden ser aún más complejas en relación a las capacidades de resistencia de los materiales y la configuración de predeterminados superficies para obtener movilidad en X, Y y Z, además de considerar el tiempo.

La retroalimentación es otro de los aspectos clave en el funcionamiento óptimo de cada una de las etapas del sistema cinético. El enfoque de retroalimentación, orientado hacia el desarrollo continuo de un modelo: generan en el proceso ramas derivadas de perfeccionamiento de componentes arquitectónicos; contribuyendo a afinar continuamente los vínculos necesarios para adaptar el modelo a circunstancias apegadas a la realidad. A medida que un determinado prototipo es mejorado, en las primeras instancias de desarrollo los cambios posiblemente sean susceptibles a modificaciones de mayor transgresión. En contraste a los cambios posteriores, cuando al modelo del prototipo está en una fase de diseño avanzado, las modificaciones serán de menor transgresión. Por lo tanto, la retroalimentación puede ser considerada como una fuente valiosa de evaluación del sistema.

Uno de los puntos clave del desarrollo del prototipo de envolvente cinética fue la autonomía. Considerando la autonomía, tanto en relación a la operatividad de funciones como a la autonomía del recurso energético. En cierto modo, los materiales con capacidades para reaccionar a estímulos externos, reducen la necesidad de componentes móviles. Para el prototipo de envolvente cinética desarrollado posiblemente la composición de materiales inteligentes sea uno de los siguientes vínculos a incorporar y seguir desarrollando: primordialmente, simplificando el modelo de envolvente cinética. Además de la movilidad autónoma, la transferencia de información es otra de las cualidades a seguir aprovechando. La transferencia autónoma de la información puede ser relevante en un entorno de comunicación colectiva entre diferentes jerarquías o estratos de objetos en un entorno más complejo como lo puede ser una ciudad.

De manera general se mencionan a continuación algunas de las posibles derivaciones de estudio para futuras investigaciones en relación a la envolvente cinética:

- a. La exploración de una mayor eficiencia de vínculos e interacción entre los procesos digitales y la materia, relacionados a uno o varios sistemas con un orden y jerarquía de funciones.
- b. La composición de materiales con capacidades de reaccionar ante estímulos del medio ambiente en un objeto con múltiples funciones capaz de recibir y transferir datos a otros sistemas.
- c. El aprovechamiento de la variabilidad del medio ambiente como un recurso de cambios factibles de ser utilizados a manera de filtro selectivo.
- d. Utilizar el cambio de las condiciones del medio ambiente para realizar operaciones estratégicas de intercambio selectivo mediante algoritmos adaptables a las necesidades de los usuarios en relación a un determinado espacio arquitectónico.
- e. La importancia del usuario en relación a los espacios arquitectónicos, evaluados de manera viceversa; alterando, variando, transformando, excluyendo o innovando características de modelos arquitectónicos pre condicionados como normales.
- f. Incorporar funciones de inteligencia a los objetos, en contraste a las funciones de estímulo respuesta, cuando la complejidad de las necesidades lo requiera.
- g. Considerar las superficies de los edificios como un recurso potencial de aprovechamiento para la cosecha de energía renovable. Aunado a la necesidad de generar de manera colectiva funciones de autonomía energética.

h. Explorar nuevos modelos de envolventes arquitectónicas, distinguiendo la importancia del prototipo como un medio de búsqueda efectivo para la posible sustitución de modelos obsoletos. Disminuyendo los tiempos de transición entre los lapsos de desarrollo tecnológico y su aplicación en la arquitectura.

i. Considerar la delimitación del espacio arquitectónico como un medio para implementar avances tecnológicos interrelacionados a los intereses en común del desarrollo colectivo de cada región.

Igualmente, cada uno de los segmentos de la envolvente cinética y los conceptos derivados pueden ser aprovechados para otros objetos o sistemas.

Referencias

Auping, M., y Ando, T. (2003). *Tadao Ando: Conversaciones con Michael Aupin*, versión castellana Isabel Núñez. Barcelona: Gustavo Gili.

Bahadori, M. N. y Dehghani-sanij, A. (2014). *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*. Nueva York: Springer.

Bar-Cohen, Y. (2003). Actuation of biologically inspired intelligent robotics using artificial muscles. *Industrial Robot: An International Journal*, 30(4), 331–337.

doi:10.1108/01439910310479702

Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2001). *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. Washington: SPIE Press.

Barnett, J., y Beasley, L. (2015). *Ecodesign for Cities and Suburbs*. Washington: Island Press.

Behling, S., Behling, St. y Schindler, B. (1996). *Sol Power: The Evolution of Solar Architecture*. Munich: Prestel.

Behl, M., Zotzmann, J., y Lendlein, A. (2010). Shape-Memory Polymers and Shape-Changing Polymers. En Lendlein, A. (Ed.), *Shape-Memory Polymers* (pp. 1-40). Berlin: Springer.

Bier, H. H. y Mostafavi, S. (2016). Robotic Building as Physically Built Robotic Environments and Robotically Supported Building Processes. En Dalton, N. S., Schnädelbach, H., Wiberg, M. y Varoudis, T. (Eds.), *Architecture and Interaction: human computer interaction in space and place* (pp. 253-271). Suiza: Springer.

Brinker, C. J., Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Londres: Academic Press.

Brooks, D. R., (2008). *Bringing the Sun Down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere*. Pennsylvania: Springer

Brown, H. (2014). *Next Generation Infrastructure: Principles for Post-Industrial Public Works*. Washington: ISLANDPRESS.

Celi, M. (2015). Preliminary Studies on AdvanceDesig. En Celi, M. (Ed.), *Advanced Design Cultures: long-term perspective and continuous innovation* (pp. 19-36). Londres: Springer.

Cellai, G., Carletti, C., Scieurpi, F., y Secchi, S. (2014). Transparent Building Envelope: Windows and Shading Devices Typologies for Energy Efficiency Refurbishments. En Magrini, A. (Ed.), *Building Refurbishment for Energy Performance: A Global Approach*. Londres: Springer.

Charles, K. E. (2003). *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada.

Chelli-Chaabouni, A. (2014). Mechanisms and Adaptation of Plants to Environmental Stress: A Case of Woody Species. En Ahmad, P. y Wani, M. R. (Eds.), *Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment* (Vol. 1, pp. 1-24). Nueva York: Springer.

Courty, S., Mine, J., Tajbakhsh, A. R., y Terentjev, E. M. (2003). Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: new electromechanical actuators. *EPL (Europhysics Letters)*, 64(5), 654.

Downton, P. F. (2009). *Ecopolis: Architecture and Cities for a Changing Climate*. Dordrecht: Springer y CSIRO.

Gleich, A. von., Pade, C., Petschow, U., y Pissarskoi, E. (2010). *Potentials and Trends in Biomimetics*. Berlin: Springer.

Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*. Nueva York: Springer.

Gruber, P. (2011). Biomimetics in Architecture [Architekturbionik]. En Gruber, P., Bruckner, D., Hellmich, C., Schmiedmayer, H.-B., Stachelberger, H., y Gebeshuber, I. C. (Eds.), *Biomimetics – Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies* (pp. 127-148). Berlin: Springer.

Gueymard, C. A. y Myers, D. R. (2008). Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling. En Badescu, V. (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (pp. 1-27). Berlin: Springer.

Hausladen, G., Saldanha, Michael de y Liedl, P. (2008). *ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy*. Birkhäuser; London: Springer, Basel.

International Architectural Exhibition, Koolhaas, R., y Biennale di Venezia. (2014). *Fundamentals: 14th international architecture exhibition*.

Jang, Sun-Young, Lee, S. y Kim, Sung-Ah. (2013). Collaborative Responsive Façade Design Using Sensor and Actuator Network. En Luo, Y. (Ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering: 10th International Conference, CDVE 2013; Alcudia, Mallorca, Spain, September 22-25* (pp. 11-18). Berlin: Springer.

Kameas, A. D., Goumopoulos, C., Hagraas, H., Callaghan, V., Heinroth, T., y Weber, M. (2009). An Architecture that Supports Task-Centered Adaptation in Intelligent Environments. En Minker, W., Weber, M., Hagraas, H., Callagan, V., y Kameas, A. D. (Eds.), *Advanced Intelligent Environments* (pp. 41-66). Nueva York: Springer.

Kistler, S. S. (1931). Coherent Expanded-Aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, 36, (1), 52-64. doi: 10.1021/j150331a003

Klein, G. A. (2010). *Industrial Color Physics*. Londres: Springer.

Krautheim, M., Pasel, R., Pfeiffer, S. y Schultz-Granberg, J. (2014). *City and Wind: Climate as an Architectural Instrument*. DOM Publishers.

Krietemeyer, B. (2016). An Interactive Simulation Environment for Adaptive Architectural Systems. En Dalton, N. S., Schnädelbach, H., Wiberg, M. y Varoudis, T. (Eds.), *Architecture and Interaction: human computer interaction in space and place* (pp. 231-252). Suiza: Springer.

Larsson, M., y Kaiser, A. (2014). Invincible Cities for the Materiomic Age. En Rasia, S. Th. y Pardalos, P. M. (Eds.), *Cities for Smart Environmental and Energy Futures: Impacts on Architecture and Technology* (pp. 53-97). Londres: Springer.

Lendlein, A., y Kelch, S. (2002). Shape-Memory Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 41, 2034–2057. doi:10.1002/1521-3773(20020617)41:12 <2034::AID-ANIE2034>3.0.CO;2-M

Loonen, R. C. G. M. (2015). Bio-inspired Adaptive Building Skins. En Torgal, F. P., Labrincha, J. A., Diamanti, M. V., Yu, C.–P., y Lee, H. K. (Eds.), *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering* (pp. 115-134). Londres: Springer.

Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J. C. y Pfeifer, R. (2007). AI in the 21st Century-With Historical Reflections. En Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J. y Pfeifer, R. (Eds.), *50 Years of Artificial Intelligence: Essays Dedicated to the 50th Anniversary of Artificial Intelligence* (pp. 1-8). Berlin: Springer.

Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Heidelberg: Springer.

Nachtigall, W. (1998). *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin: Springer.

Norton, B. (2014). *Harnessing Solar Heat*. Londres: Springer.

Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architecture Regionalism*. New Jersey: Princeton University Press.

Oosterhuis, K. (2003). *Hyperbodies: Towards An E-motive Architecture*. Basel: Birkhäuser.

Pajonk, G. M. (2003). Some Applications of Silica Aerogels. *Colloid and Polymer Science*, 281, 637–651. doi: 10.1007/s00396-002-0814-9

Paricio, I. (1999). *La protección solar*. Barcelona: Bisagra.

Peters, S. (2010). *Material Revolution: Sustainable and Multi-Purpose Materials for Design and Architecture*. Berlin: Birkhäuser.

Pierre, A. C. (2011). History of Aerogels. En Aegerter, M. A., y Prassas, M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 3-18). Londres: Springer.

Pierre, A. C., y Rigacci, A. (2011). SiO₂ Aerogels. En Aegerter, M. A., y Prassas, M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 21-45). Londres: Springer.

Pohl, G. y Nachtigall, W. (2015). *Biomimetics for Architecture & Design: Nature-Analogies-Technology*. Londres: Springer.

Ratti, C., y Claudel, M. (2014). The Rise of the "Invisible Detail": Ubiquitous Computing and the "Minimum Meaningful". *Architectural Design*, 84(4), 86-91. John Wiley & Sons, Ltd.

Samatham, R., Kim, K. J., Dogruer, D., Choi, H.R., Konyo, M., Madden, J.D., Nakabo, Y., Nam, J.-D., Su, J., Tadokoro, S., Yim, W., y Yamakita, M. (2007). Active Polymers: An Overview. En Kim, K. J., y Tadokoro, S. (Eds.), *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors* (pp. 1-36). Londres: Springer.

Sauter, F. (2007). THE SUN ALSO SHINES TODAY. En Mateo, J. L. (Ed.), *Architectural Papers III: NATURAL METAPHOR; An Anthology of Essays of Architecture and Nature* (pp. 94-97). ACTAR.

Schneider, F. (2011). OKAGEL: High Insulating Day Lighting Systems. En Aegerter, M. A., Leventis, N., y Koebel, M. M. (Eds.), *Aerogels Handbook: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies* (pp. 879-888). Londres: Springer.

Stuart-Smith, R. (2014). Qualitative Affects of Building Life Cycle: The Formation of Architectural Matter. En Rassia, S. Th. y Pardalos, P. M. (Eds.), *Cities for Smart Environmental and Energy Futures: Impacts on Architecture and Technology* (pp. 99-111). Londres: Springer.

Tedeschi, E. (1969). *Teoría de la arquitectura*, 2da ed. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.

Tillotson, T. M., y Hrubesh, L. W. (1992). Transparent ultralow-density silica aerogels prepared by a two-step sol-gel process. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, 44-50. doi: 10.1016/S0022-3093(05)80427-2

Tsou, P. (1995). Silica aerogel captures cosmic dust intact. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 415–427.

Watson, D. (2013). Bioclimatic Design. En Loftness, V. y Haase, D. (Eds.), *Sustainable Built Environments* (pp. 1-68). Nueva York: Springer.

Vita-Finzi, C. (2008). *The Sun: A User's Manual*. Londres: Springer.

Zemella, G. y Faraguna, A. (2014). *Evolutionary Optimisation of Façade Design: A New Approach for the Design of Building Envelopes*. Londres: Springer.

Referencias de páginas Web

Arduino™. (13/08/16). Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUnoSMD>

Arduino™. (13/08/16). Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

Glosario

Algoritmo: Un algoritmo es una secuencia o estructura formulada para resolver un determinado problema. El ordenamiento de la estructura del algoritmo es de suma importancia para resolver el problema y vincularlo con otros procedimientos.

Cinético: Característica de los objetos para realizar movimientos vinculados a la capacidad de adaptación, reacción y eficiencia del sistema.

Contexto: Las condiciones que caracterizan y brindan a su vez un significado a las partes que integran un entorno vinculado.

Ecopolis: Desarrollo de las ciudades con fundamentos en las necesidades y capacidades de adaptación, tomando en consideración los recursos del medio ambiente, sociales, políticos y económicos. Asimismo, la disposición de los recursos en un contexto de uso eficiente y variable en el tiempo.

Envolvente: La envolvente de los edificios es una delimitación espacial entre el medio ambiente y el interior del edificio. La envolvente incluye todas las superficies que separan dos o más contextos. Los dos contextos divididos pueden ser el medio ambiente y el control deseado de condiciones deseables para los usuarios al interior del edificio.

Híbrido: Es el resultado de combinar un sistema pasivo con uno activo, para formar un sistema híbrido. El porcentaje de uso de un sistema pasivo o activo, generan sistemas híbridos con distintas cualidades y rangos de eficiencia.

Input: El conjunto de datos introducidos al sistema para su uso en el proceso o sistema.

Interacción: La posibilidad de controlar, reaccionar, manipular, combinar o ejercer un efecto entre los conjuntos u objetos. Está influenciado por uno o varios vínculos entre dos o más objetos o conjuntos, las acciones son recíprocas.

Output: Es el resultado de un proceso, para su uso directo o la transferencia a otro proceso o sistema.

Permisibilidad: Es el grado de admisión en relación a un filtro selectivo, permitiendo el acceso a determinados elementos y/o conjuntos.

Procedimiento: Se hace referencia al método para realizar un conjunto de operaciones con la finalidad de tener un grado de control en las fuentes de suministro, las acciones y el resultado.

Reacción: La capacidad de respuesta ante el cambio. La acción de respuesta ante un estímulo o evento.

Sinergia: Es el resultado de la cohesión de las partes, con la finalidad de generar posibles vínculos y obtener un modelo fortalecido en su conjunto. A diferencia de la eficiencia de cada una de las partes que forman el conjunto.

Anexos

Flujo de energía

$$q = U_t * A_{pf} (t_{out} - t_{in}) + (SHGC_t * A_{pf} * E_t)$$

- q = flujo de energía instantánea, W (Btu/h).
 U_t = coeficiente global de transferencia de calor (U-factor), W/m²-°K (Btu/h-ft²-°F).
 t_{in} = temperatura interior del aire, °C (°F).
 t_{out} = temperatura exterior del aire, °C (°F).
 A_{pf} = área total proyectada de fenestración, m² (ft²).
 $SHGC_t$ = coeficiente global de ganancia de calor solar, no dimensional.
 E_t = irradiancia total incidente, W/m² (Btu/h-ft²).

(3-1)

U-factor

$$U_t = \frac{[\sum (U_f * A_f) + \sum (U_d * A_d) + \sum (U_e * A_e) + \sum (U_{de} * A_{de}) + \sum (U_c * A_c)]}{A_{pf}}$$

- U_t = producto total U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_{pf} = área de producto de fenestración proyectada, m² (ft²).
 U_f = marco U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_f = área del marco, m² (ft²).
 U_d = divisor U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_d = área del divisor, m² (ft²).
 U_e = borde de acristalamiento U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_e = área del borde de acristalamiento, m² (ft²).
 U_{de} = borde del divisor U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_{de} = área del borde del divisor, m² (ft²).
 U_c = centro del acristalamiento U-factor, W/m²-°K, (Btu/hr-ft²-°F).
 A_c = área del centro de acristalamiento en ft² (m²).

(4-1)

* Ecuaciones tomadas de la siguiente referencia: National Fenestration Rating Council, Inc. (2017). *THERM 7 / WINDOW 7 NFRC Simulation Manual*. NFRC.

Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

$$SHGC_t = \frac{[(SHGC_f * A_f) + (SHGC_d * A_d) + (SHGC_e * A_e) + (SHGC_{de} * A_{de}) + (SHGC_c * A_c)]}{A_{pf}}$$

SHGC _t	= producto total SHGC (sin dimensiones).
A _{pf}	= área del producto de fenestración proyectada, m ² (ft ²).
SHGC _f	= marco SHGC (sin dimensiones).
A _f	= área del marco en, m ² (ft ²).
SHGC _d	= divisor SHGC (sin dimensiones).
A _d	= área del divisor en, m ² (ft ²).
SHGC _e	= borde del acristalamiento SHGC (sin dimensiones).
A _e	= área del borde del acristalamiento en, m ² (ft ²).
SHGC _{de}	= borde del divisor SHGC (sin dimensiones).
A _{de}	= área del borde del divisor en, m ² (ft ²).
SHGC _c	= centro del acristalamiento SHGC (sin dimensiones).
A _c	= área del centro del acristalamiento, m ² (ft ²).

(4-2)

Visible Transmittance (VT)

$$VT_t = \frac{[(VT_f * A_f) + (VT_d * A_d) + (VT_e * A_e) + (VT_{de} * A_{de}) + (VT_c * A_c)]}{A_{pf}}$$

VT _t	= producto total VT (sin dimensiones).
A _{pf}	= área del producto de fenestración proyectada, m ² (ft ²).
VT _f	= marco VT (sin dimensiones).
A _f	= área del marco, m ² (ft ²).
VT _d	= divisor VT (sin dimensiones).
A _d	= área del divisor, m ² (ft ²).
VT _e	= borde del acristalamiento VT (sin dimensiones).
A _e	= area del borde del acristalamiento, m ² (ft ²).
VT _{de}	= borde del divisor VT (sin dimensiones).
A _{de}	= área del borde del divisor, m ² (ft ²).
VT _c	= centro del acristalamiento VT (sin dimensiones).
A _c	= área del centro del acristalamiento, m ² (ft ²).

(4-3)

* Ecuaciones tomadas de la siguiente referencia: National Fenestration Rating Council, Inc. (2017). *THERM 7 / WINDOW 7 NFRC Simulation Manual*. NFRC.

Asimismo, considerar que las ecuaciones anteriores derivan de las siguientes referencias:

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2001). *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. ASHRAE.

Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013). *THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual*. Berkeley.

National Fenestration Rating Council. (2013). *NFRC: 100-2014 Procedure for Determining Fenestration Product U-factors*. NFRC.

National Fenestration Rating Council. (2013). *NFRC: 200-2014 Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence*. NFRC.

