

# Fachada variable: Solución para un edificio de muro cortina en Santiago

**Pedro Pablo de la Barra Luegmayer**

**Claudio Vásquez Zaldívar**

Artículo producido a partir de tesis de magíster

Profesor guía: Claudio Vásquez Z.

## EL EDIFICIO DE OFICINA

El proceso de crecimiento económico vivido en Chile en la década de los noventa alcanzó el mercado de los materiales, en especial la industria del vidrio y sus métodos de producción (Vásquez, 2006). Esto provocó que a comienzos del siglo XXI el sector inmobiliario incorporara estos avances y desarrollara un nuevo mercado de edificios de oficinas. En arquitectura, esto condujo a la introducción de modelos arquitectónicos pertenecientes a otras latitudes, reflejándose en la aplicación masiva de un alto grado de transparencia en sus fachadas a pesar del clima árido de Santiago (Vásquez, Encinas y D'Alençon, 2015). Esta transparencia alcanzada por los nuevos desarrollos en fachada de la emergente construcción de edificios de oficinas se tradujo en un alto consumo de energía necesaria para evitar el sobrecalentamiento por radiación solar directa y asegurar las condiciones mínimas de confort interior. Esto es confirmado por la investigación llevada a cabo en el marco del proyecto Fondecyt 1130815, "Definición de la línea base de consumo energético y funcionamiento del ambiente interior en edificios de oficina de Santiago", basada en la primera medición de edificios de oficinas construidos entre el año 2005 y 2011, la que se enfocó en determinar el consumo de energía y la calidad del ambiente interior de los edificios de fachadas transparentes. En esta investigación además se verificó que el alto consumo eléctrico de los edificios de oficina en Santiago se relaciona principalmente a las condiciones de diseño de sus envolventes, asociada a la falta de comprensión del clima propio del contexto en que se instalan y la desestimación de las propiedades de los materiales de la envolvente, intentando en algunos casos mejorar esta situación con la incorporación de protecciones solares que resultan ser ineficaces por su falta de criterio.

Así, el edificio de oficina en altura con fachada completamente acristalada en Santiago se constituye como un problema instalado tanto desde el punto de vista de confort de las personas que los habitan como también energético.

## FLEXIBILIDAD EN LA ARQUITECTURA

En relación al problema energético se ha establecido el concepto de 'edificio cero energía', el cual está referido – describe Perino – a aquella edificación que, sobre el período anual, utiliza tanta energía como la generada por él en base a los recursos energéticos renovables disponibles en el medioambiente (Perino, Favoino, Goia y Serra, 2013).

En torno a la idea del 'edificio cero energía', Mark Meagher identifica dos componentes con que todo edificio cuenta y a través de los cuales se puede hacer frente a esta situación: la parte fija y el cuerpo variable del edificio. La primera (parte fija) está referida a aquellos aspectos como la localización y estructura que varían tan poco durante la vida útil del edificio que son considerados elementos estáticos o pasivos. La segunda (parte variable) se relaciona con la capacidad de adaptación del edificio al rango de contingencias que caracterizan el día a día (Meagher, 2015). Cambios en el medioambiente, variaciones en el comportamiento y necesidades de las personas son aspectos que requieren un certero grado de flexibilidad. Alcanzar esta flexibilidad o maleabilidad en el edificio es crucial para atacar de forma eficaz el problema del confort y el consumo energético.

La fachada es uno de los elementos del edificio que tiene la capacidad de lograr este grado de flexibilidad. Así queda de manifiesto en la descripción que desarrolla Moloney sobre los cinco sistemas arquitectónicos de composición a través de los cuales se expresa el desarrollo de la fachada en la historia (Moloney, 2011). Los primeros tres son elaborados por Emil Kaufmann a principios del siglo XX y describen la evolución compositiva de este tipo de componentes. Estos se desarrollan desde los 'sistemas antiguos' (FIG. 01a) que se caracterizaron por una construcción centrada en la relación proporcional de las partes que estructuraban la fachada para, luego, avanzar hacia la composición basada en la tensión jerárquica entre

los elementos que construyen el frontis del edificio (FIG. 01b), terminando con un sistema que está definido por la armonía y la relación no jerárquica entre las partes, articulándose la composición mediante la repetición (FIG. 01c). Estos tres sistemas describen una fachada que colaboraba directamente con la estructura del edificio, por lo que sus posibilidades diagramáticas y constructivas estaban condicionadas a la situación estructural específica.

Moloney incorpora dos sistemas adicionales a esta descripción. La neutralidad de la grilla generada por el muro cortina moderno (FIG. 01d), en donde el 'todo' está en relación con la 'totalidad' del edificio, lo que se desarrolla desde las posibilidades de la fachada libre del modernismo. Por otro lado, el siglo XXI, en conjunto con las tecnologías digitales, ha facilitado la relación del 'todo' con la totalidad del edificio gracias a la explotación del máximo potencial vinculado al desarrollo de la fachada libre y la capacidad de los software de diseño para una modulación independiente de la envolvente respecto a la estructura del edificio (FIG. 01e). Con esta operación se pierde completamente la uniformidad; la fachada no expresa los principios formales implícitos en la estructura del edificio, sino que define su propio lenguaje geométrico en pos de la estética y los ideales de funcionalidad'. Así, la fachada evoluciona en un elemento maleable, independiente de la estructura estática del edificio, caracterizándose por esa libertad que, en términos proyectuales y constructivos, se traduce en aquella flexibilidad necesaria para el desarrollo de sistemas de mediación más eficientes con el medioambiente exterior.

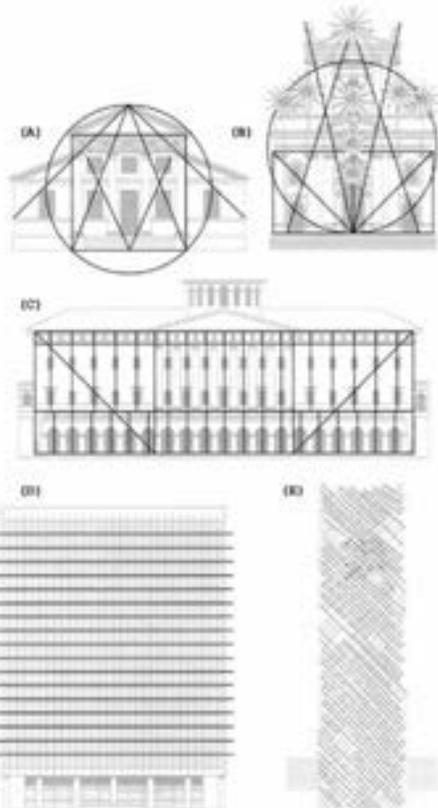


FIG. 01

De esta manera, podría articularse un sexto sistema arquitectónico que además de modular la fachada de forma independiente a la estructura portante del edificio incorporara una segunda capa

de geometrías de protección solar para lograr una respuesta eficiente a las condiciones climáticas exteriores con el fin de alcanzar un adecuado acondicionamiento del interior. Como explican Hausladen, De Saldanha y Liedl, esto se lleva a cabo de tres maneras hoy en día: mediante el control solar interior, control solar en el medio de la cavidad vidriada y el control solar exterior.

Los sistemas de protección internos tienen la ventaja de ser ajustados directamente por los usuarios y con costos de mantención bajos, aunque no son eficientes en el manejo del sobrecalentamiento. Los sistemas de protección solar alojados al interior de la cavidad vidriada pueden ser muy eficientes, siempre y cuando logren resolver el limitado alcance en cuanto a su forma y variabilidad, que muchas veces no es suficiente para lograr un control efectivo del flujo solar. Por último, los sistemas de protección solar externos pueden ser de tres a cinco veces más efectivos que otros, ya que bloquean la radiación solar antes que pueda alcanzar e impactar en la fachada, pero como desventaja se cuentan sus altos costos de mantención y su dependencia a las condiciones climáticas (Hausladen, De Saldanha y Liedl, 2008).

A pesar de las desventajas presentes en cada una de las formas de intervención, los sistemas de protección externos son la alternativa con mayor potencial para mejorar el comportamiento medioambiental interior de los edificios. La dependencia de estos sistemas a las condiciones de viento puede ser resuelta desde el diseño y su coherencia estructural, mientras que los costos de mantención pueden ser subsidiados por lo ahorrado en energía y los beneficios ambientales internos que impactan directamente en la productividad y bienestar de sus usuarios (Bakker, Hoes-Van Oeffelen, Loonen y Hensen, 2014). Sin embargo, los sistemas más utilizados hoy en día para generar un control solar efectivo en este tipo de edificios son los sistemas de protección internos (Hausladen, De Saldanha, y Liedl, 2008), aunque es claro que la solución debería tender a la implementación de aquellos que actúan en la zona exterior de la envolvente vidriada del edificio para resolver así el problema energético y calidad del ambiente interior que presentan los edificios de oficinas actualmente en operación.

#### SISTEMAS DE CONTROL SOLAR ACTIVOS

Las estrategias de diseño asociadas al bajo consumo energético y el confort interior han derivado en dos direcciones alternativas: las tecnologías activas y las estrategias pasivas. La primera aproximación tiene como objetivo mejorar el nivel de sustentabilidad del medioambiente interior a través de la introducción de innovadores dispositivos técnicos (Ramzy y Falled, 2011). Cada dispositivo es utilizado por medio de la generación y suministro descentralizado de energías renovables o a través de la utilización de los recursos energéticos disponibles. En cambio, el término pasivo, como afirma Perino, se refiere a edificios donde el diseño y la forma de la construcción por sí solos son capaces de capturar, almacenar y distribuir el viento y la energía solar, normalmente con el objetivo de desplazar el uso habitual de los combustibles fósiles para alimentar los sistemas de climatización e iluminación (Perino, Favoino, Goia y Serra, 2013).

El principal problema de los sistemas pasivos – o fijos – radica en que estos controlan factores

medioambientales que impactan al edificio sólo en aquellos momentos en donde es más necesario o en reducidos intervalos dentro del amplio rango de tiempo en el que el edificio debe estar operativo. Esto se debe a que el clima es un sistema dinámico complejo, cuyo constante cambio está asociado a múltiples factores que lo hacen impredecible. Al respecto, Ryan Hansanuwat comenta que el rendimiento del sistema de fachada de un edificio puede aumentar sustancialmente si se piensa en la posibilidad del movimiento, adaptándose dinámicamente a las condiciones ambientales variables, optimizando así aún más el equilibrio entre sombreado, iluminación natural y la posibilidad de relación visual con el exterior (Hansanuwat, 2010).

Así lo demuestran estudios preliminares realizados por Nielsen, Svendsen y Jensen. En este caso, a través de simulaciones se comparan tres tipos de protecciones solares diferentes: sin protección solar (A), celosía fija horizontal (B) y celosía móvil (C) (FIG. 02). Esta evaluación se basó en parámetros como demandas por calefacción, demandas por enfriamiento y demandas por iluminación artificial. Además, se incorporó la altura de la ventana y la orientación como variables a evaluar, por lo que las simulaciones se llevaron a cabo para las cuatro orientaciones principales (norte, sur, este y oeste) en alturas de ventanas de 1, 1,5 y 2 metros. El resultado demostró que el mejor comportamiento general lo presentó la fachada dinámica, específicamente en tamaños de ventana superiores a 1,5 metros. A pesar de que el rendimiento de la protección dinámica no supera el 16% respecto a los otros dos tipos, Nielsen, Svendsen y Jensen argumentan que este es un buen antecedente considerando la escasa participación del diseño como variable importante para lograr un mejor resultado (Nielsen, Svendsen y Jensen, 2011).

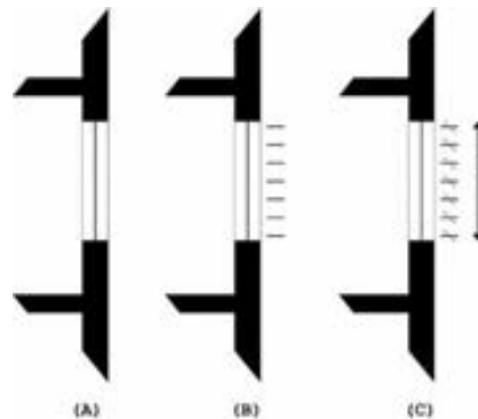


FIG. 02

Tzempelikos y Athienitis también llevaron a cabo un estudio que midió, en base a simulaciones, el rendimiento de una pantalla automática tipo roller versus una pantalla del mismo tipo, estática y completamente cerrada (FIG. 03), incluyendo además sistemas de control de la iluminación artificial para medir su incidencia en el consumo. Nuevamente, los resultados demostraron que el movimiento automático asociado a los sistemas de sombreado exterior mejora el rendimiento energético del edificio, concluyendo que el manejo automático de la iluminación artificial influye significativamente en el consumo (Tzempelikos y Athienitis, 2007).

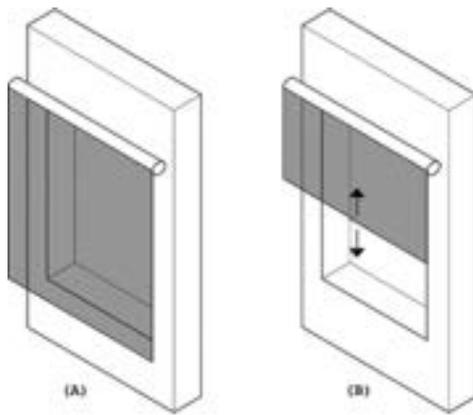


FIG. 03

Aspecto importante dentro del desarrollo de fachadas móviles es la simulación a través de modelos digitales. Esto tiene como principal objetivo acelerar el proceso de diseño mediante una serie de visualizaciones en las que se emulan características climáticas particulares. Esta forma de operar ha tenido buenos resultados en el desarrollo de protecciones solares fijas, ya que los programas se han especializado en incorporar el comportamiento y dinamismo de las condiciones medioambientales que afectan al edificio. Sin embargo, esto adquiere una complejidad mayor cuando se trata de elementos móviles de fachada, ya que las variables asociadas al universo de movimientos son muy diversas. Es por este motivo que muchas de las referencias bibliográficas estudiadas realizan simulaciones de envolventes móviles enfocándose en movimiento sencillos.

A raíz de esto último, dentro del marco de esta investigación se realizaron pruebas de laboratorio utilizando prototipos construidos con el fin de verificar, por medio de experimentos empíricos, la real eficacia del movimiento en la envolvente para controlar parámetros ambientales exteriores que impactan en el interior. Estas pruebas se llevaron a cabo en laboratorios que permiten ensayar prototipos construidos a escala 1:5, considerando variables como la radiación, iluminación y temperatura. Los prototipos medidos son similares a los modelos testeados por Nielsen, Svendsen y Jensen (Nielsen, Svendsen y Jensen, 2011), correspondiendo a una protección compuesta por celosías horizontales móviles, las que se activan dependiendo de la cantidad de radiación incidente en el plano de fachada – en momentos de radiaciones cercanas a  $0 \text{ w/m}^2$  la protección se encuentra en  $90^\circ$  respecto al plano vidriado y, a medida que esta aumenta, la protección se cierra progresivamente. La celosía móvil se comparó con una protección de celosías horizontales fijas, realizándose la medición durante un día de verano completamente soleado.

Los resultados de esta prueba demuestran que la aplicación de movimiento en sistemas de sombreado mejora el rendimiento que puede alcanzar un elemento de control solar en términos de ganancias solares, permitiendo además un manejo efectivo de la luz natural disponible (FIG. 04). También permite comprender que los sistemas o algoritmos de control afectan el comportamiento de la protección móvil de forma significativa, ya que, como se puede observar en los gráficos, el movimiento actúa mucho mejor sobre el bloqueo de la radiación que controlando la variable lumí-

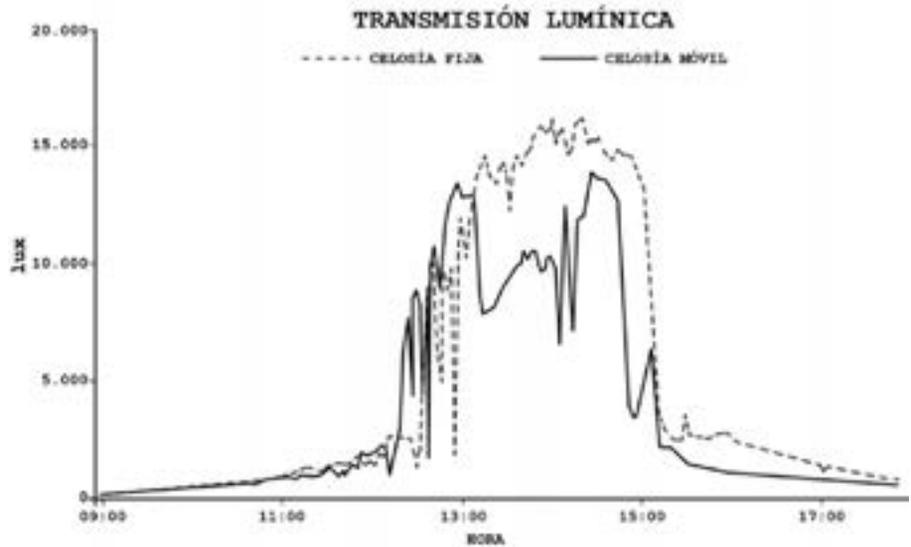
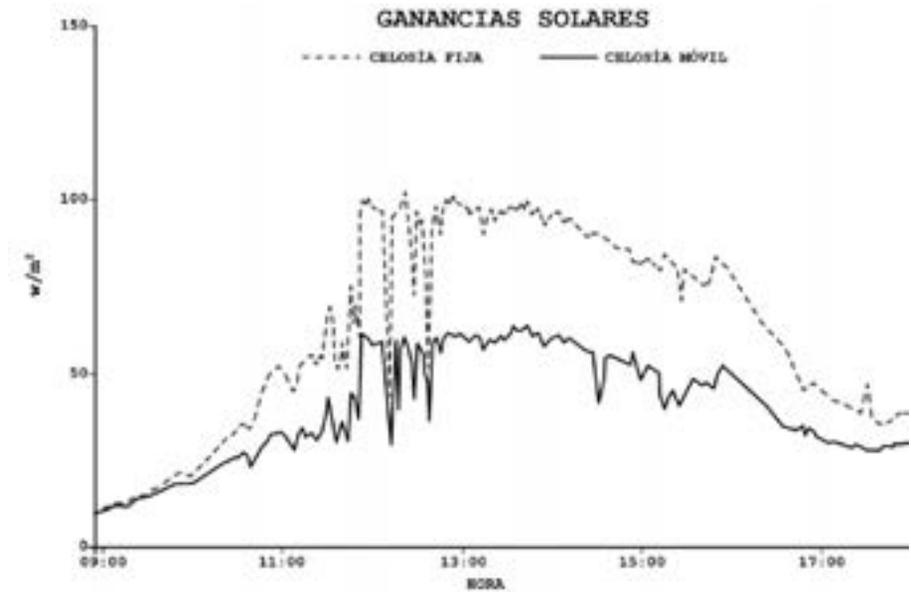


FIG. 04

nica, debido a que el prototipo móvil se manipuló mediante un sensor de radiación.

Es así como la mejor opción para intervenir las fachadas vidriadas de edificios de oficinas parecen ser los dispositivos adaptables o sistemas de protección solares exteriores activos para poder alcanzar un mejor control del flujo solar en todo momento del período diario, estacional y anual, desarrollando una intervención que, al ser exterior, conlleva menos complicaciones en términos constructivos (intervención de edificios existentes), mejorando además su comportamiento térmico al reducir al máximo la radiación solar directa y disminuyendo significativamente las demandas energéticas.

#### PROPUESTA

Tanto los edificios que hoy están en operación como aquellos que se siguen diseñando y construyendo bajo el criterio de la fachada completamente acristalada en Santiago representan

el problema que esta investigación busca resolver a través de un sistema de fachada mecánico adaptativo compuesto de geometrías variables que puedan ayudar a mitigar los diversos problemas ambientales al interior. Con esto se pretende disminuir la necesidad de sistemas activos de climatización usados para enfriar, calefaccionar e iluminar el interior, intentando mejorar también la sensación de confort de los ocupantes.

La respuesta dinámica o variable a nivel de la fachada se articula bajo dos componentes principales: la geometría y los mecanismos. Desde la perspectiva de la arquitectura parece más evidente abordar el problema de la variabilidad desde la geometría para establecer qué tipos de figuras actúan de forma eficiente dentro del desarrollo de fachadas cinéticas (Ibáñez, Martín, Vidauree y Sacristán, 2014); sin embargo, los mecanismos son igualmente importantes en la constitución geométrica de este tipo de sistemas por la manipulación de los elementos que la componen, siendo además determinantes en

la factibilidad de su implementación y operación en el tiempo (Tanaka, Shibutani, Izumi y Sakai, 2012). De esta manera, la investigación se propone desarrollar un sistema mecánico, haciéndose la siguiente pregunta: ¿qué tipo de principio mecánico permitiría desarrollar un componente de baja complejidad (factibilidad del sistema) y alto grado de adaptabilidad (libertad compositiva) que logre a la vez un alto potencial en la respuesta ambiental interior?

Esto se resuelve por medio del principio mecánico de un solo eje de desarrollo variable (Fig. 5) que fue elaborado en el marco de esta investigación para dar cuenta del potencial de mejora ambiental que tendría este tipo de sistemas asociado, por una parte, a la diversidad de movimientos que pueden generar y, por otra, a la variedad de formas que manipula. Esta versatilidad permitirá eventualmente una gran libertad en la definición de la forma arquitectónica externa del edificio, en el contexto de la implementación de sistemas dinámicos responsivos en protecciones solares móviles en edificios de oficina en Santiago.

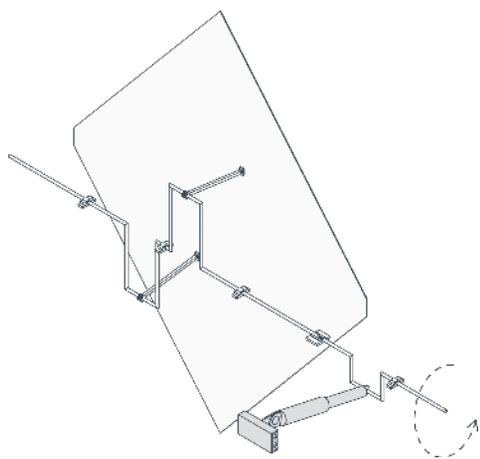


FIG. 05

## PROTOTIPOS

El principio mecánico planteado y desarrollado fue evaluado por medio de la elaboración de cuatro prototipos a escala 1:5, construyendo cada uno un sistema dinámico responsivo de características específicas, utilizando el mismo principio mecánico. Cada uno de estos prototipos da cuenta de la versatilidad del principio elaborado – al adaptarse a distintas configuraciones geometrías planas y a diversos movimientos – además de expresar su sencillez por medio de la construcción.

En términos geométricos, estos prototipos se agrupan en dos conjuntos principales: prototipos de geometrías confinadas y prototipos de geometrías libres. En los prototipos de geometrías confinadas se elaboró un modelo de movimiento simétrico en base a la rotación de los elementos y un modelo de movimiento asimétrico por medio de la rotación como principal operación de movimiento. En los prototipos de geometrías libres se construyó un modelo de movimiento simétrico basado en la rotación y traslación de sus elementos, además de otro que contiene un movimiento asimétrico operado por rotación y traslación.

De esta manera se fabricaron cuatro modelos de protección solar que expresan la variabilidad formal que es capaz de soportar un mismo principio mecánico aplicado. A continuación, se presentan cada uno de ellos.

### PROTOTIPO 1 (FIG. 6a)

Geometría confinada + movimiento simétrico

Se compone de cuatro triángulos equivalentes, cada uno abisagrado desde una de sus aristas. Esta bisagra se sujeta del marco que contiene todo el sistema mecánico, razón por la cual pertenece a un sistema móvil de geometría confinada. El mecanismo que da movimiento a los elementos de sombreado logra una configuración que permite que todos los elementos se muevan al unísono.

### PROTOTIPO 2 (FIG. 6b)

Geometría confinada + movimiento asimétrico

Este se compone de tres triángulos distintos entre sí. Al igual que el prototipo anterior, los elementos se abisagran desde una de sus aristas a la estructura que sostiene el sistema

completo, por lo cual también pertenece a la categoría de geometría confinada. Sin embargo, la configuración mecánica permite que los elementos se desplacen de manera independiente, logrando que el movimiento de cada uno describa una dirección y magnitud particular, lo que se califica como asimétrico.

### PROTOTIPO 3 (FIG. 6c)

Geometría libre + movimiento simétrico

En este caso, el elemento geométrico a manipular corresponde a un cuadrado (un poco más pequeño que el área en donde se inscribe el movimiento) que no se sostiene a la estructura portante de sistema, sino que se vincula directamente al mecanismo a través de barras que permiten su manipulación. Estas barras cuentan con unos rieles por donde el movimiento se desarrolla de manera controlada. En relación al desplazamiento geométrico, el mecanismo es configurado para un movimiento de inclinación vertical con un pequeño desplazamiento, dando pie a lo que sería un alero y un colector solar dependiendo de su posición.

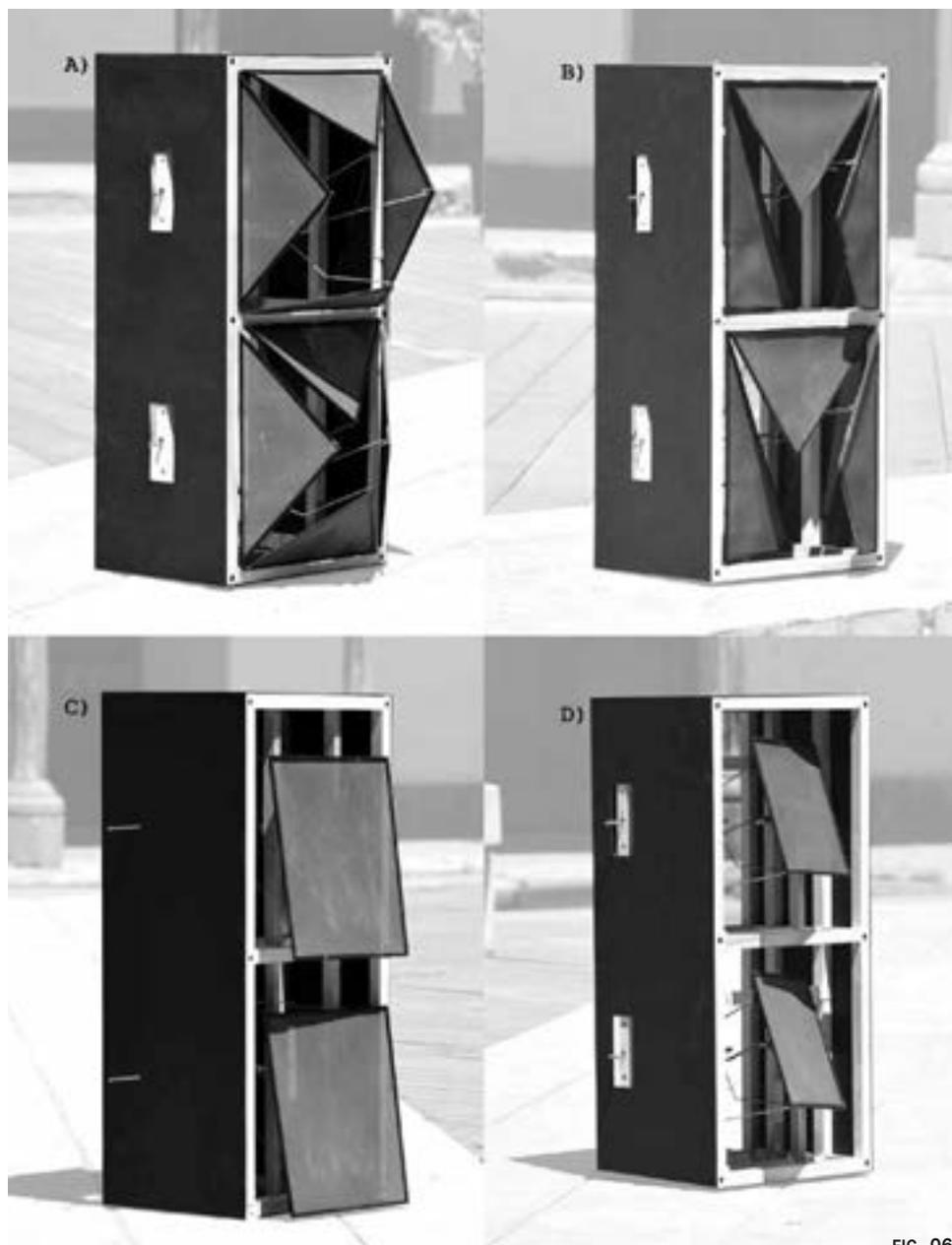


FIG. 06

Por esto último se considera que este prototipo es de movimiento simétrico.

#### PROTOTIPO 4 (FIG. 8d)

Geometría libre + movimiento asimétrico  
Aquí el elemento geométrico manipulado corresponde a un cuadrado cuya proporción equivale a la mitad del área dispuesta para su movimiento. Al tratarse de una geometría libre, el elemento no se vincula a la estructura, sino que al mismo mecanismo por medio de tres barras de las cuales dos se asocian a una guía y un riel respectivamente. El mecanismo se configura para permitir que el elemento se mueva con gran libertad, describiendo una parábola que tiene la función de perseguir la trayectoria solar para lograr su obstrucción. En este sentido, se trata de un movimiento asimétrico compuesto de una serie de traslaciones y rotaciones.

#### MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE PROTOTIPOS

La evaluación del rendimiento de los prototipos se desarrolló en un laboratorio de mediciones orientado hacia el norte que consta de dos cámaras de registro de datos, tanto de radiación solar como de iluminación, el que está acondicionado para modelo de sistemas de fachadas a escala 1:5.

Las cámaras son cajas de poliuretano de alta densidad de 100 mm de espesor cuyas dimensiones a escala corresponden a un espacio de 1,2 m de ancho,

6,0 m de profundidad y 3,0 m de altura, cerrado en cinco caras y abierto en la sexta, donde se dispone una ventana que ocupa todo el frente para simular una fachada completamente vidriada. Paralelo a la cara transparente se dispone una subestructura que permite instalar los prototipos de protección solar como una doble piel exterior.

Los sensores utilizados para la medición corresponden a piranómetros, luxómetros, termómetros ambientales y termómetros superficiales (temperatura del vidrio). De este laboratorio se obtienen una serie de métricas que son utilizadas para desarrollar los análisis que permitan establecer una evaluación cuantitativa y cualitativa de los prototipos. Este análisis tiene como fin determinar si el mecanismo de un solo eje de desarrollo variable cuenta con un potencial de mejoramiento ambiental.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MEDICIÓN DE PROTOTIPOS

Con la campaña de medición llevada a cabo en el laboratorio se evaluaron específicamente dos aspectos: el bloqueo de la radiación – el cual disminuye el sobrecalentamiento interior de los edificios – y el manejo de la luz natural – para mejorar las condiciones de iluminación natural interior, evitando el uso de luz artificial.

Los valores obtenidos para cada prototipo cuentan además con una muestra de control o referencia que

corresponde a una segunda cámara que permitió visualizar en paralelo el comportamiento del mismo recinto sin protección solar.

#### ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR TRANSMITIDA

El análisis de radiación solar transmitida identificó en qué medida los prototipos desarrollados permiten bloquear dinámicamente la radiación incidente. Esto definirá un cierto potencial de mejora ambiental interior en cuanto el prototipo ensayado alcance un tratamiento de la radiación distinto a la muestra de referencia, logrando además una clara relación con el sistema de control basado en la radiación incidente. Este análisis se abordó por medio de la elaboración de gráficos temporales que muestran la tendencia o comportamiento de la radiación registrada inmediatamente al interior del plano vidriado de fachada en distintos momentos del día. Este se construyó para cada prototipo, asociándose además a un esquema que representa la posición de los elementos del sistema de protección, definidas por los valores registrados de radiación incidente. De este modo se comprendió cómo las distintas posiciones de cada prototipo generan variaciones en los niveles de radiación transmitida hacia el interior del laboratorio.

A continuación, se presentan los gráficos que contienen los resultados de radiación transmitida (FIG. 7) para cada prototipo testeado, contrastados con los datos de la muestra de referencia.

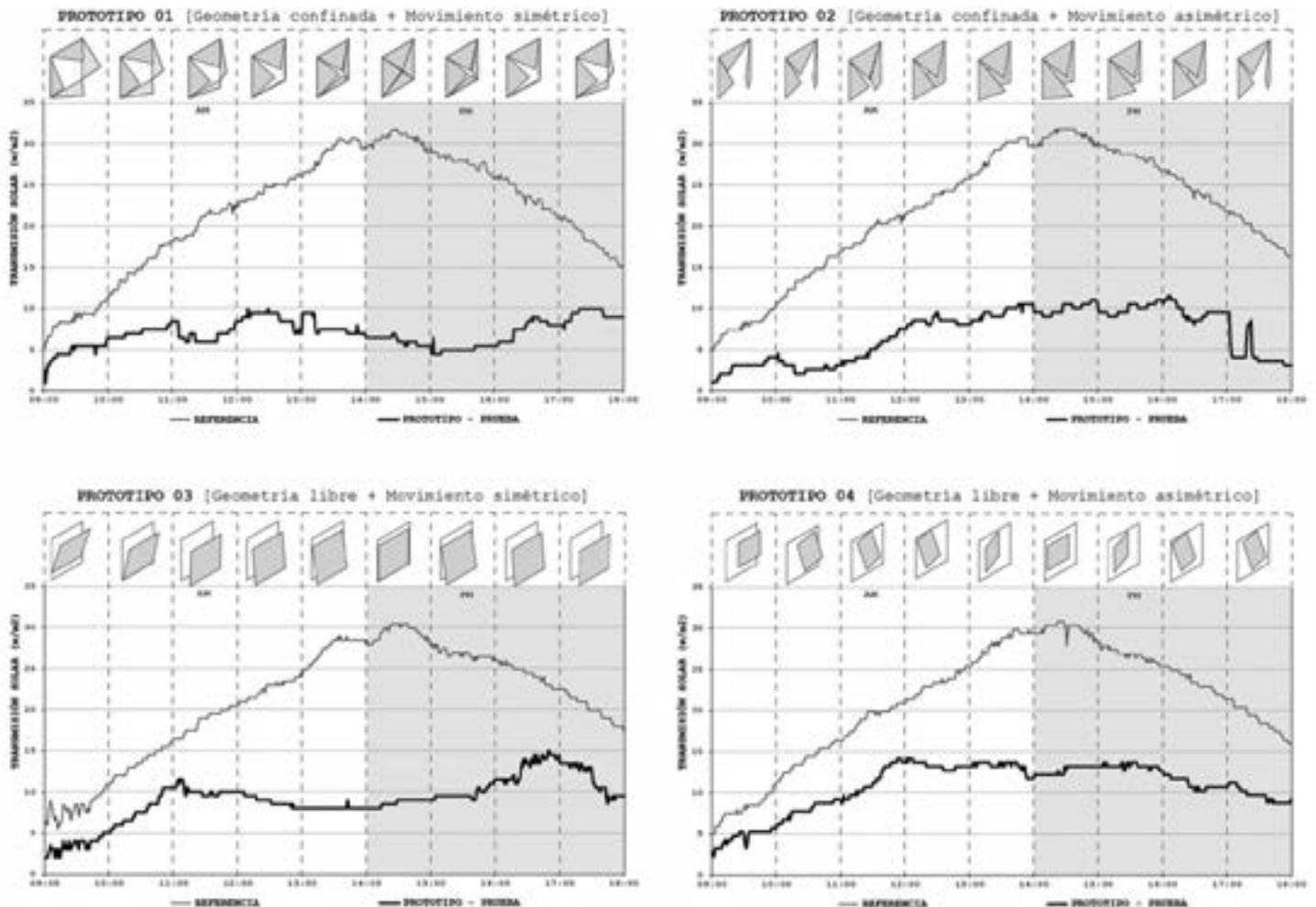


FIG. 07

En los gráficos se aprecia la tendencia de todos los prototipos al manejo de los valores de radiación a lo largo del día, lo que se evidencia en el comportamiento marcadamente horizontal (línea negra) que contrasta con los valores de la muestra de referencia (línea gris) que crecen progresivamente desde la mañana hasta lograr el peak alrededor del mediodía para, luego, decaer con la misma pendiente hacia la tarde. De esta manera, todos los prototipos alcanzan valores de radiación que se desacoplan de los alcanzados por la referencia.

Sin embargo, este desacople se describe con una gradualidad tal que permite definir tres momentos generales: el período de la mañana, caracterizado por un aumento de la radiación tanto en los prototipos como en la referencia, cuya disociación es leve y se extiende aproximadamente hasta las 11.00 horas. En el período del mediodía (11.00 – 16.00 aprox.) el desacople es total, ya que no existe relación alguna entre la forma de la curva de valores de referencia y la horizontalidad de los valores de los prototipos. Por último, en el período de la tarde (16.00 – 18.00 aprox.) se aprecia un comportamiento similar de la referencia y los prototipos, pero con diferencias significativas en los niveles de radiación registrados.

La horizontalidad de los gráficos en los resultados de cada prototipo podría entenderse como la acción del algoritmo de control que responde a la radiación incidente, lo que permitió accionar el sistema mecánico para obstruir la mayor porción de la radiación registrada al exterior. Sin embargo, todo esto es en términos generales, ya que si se observan las particularidades de los gráficos de cada uno de los prototipos analizados, se encontrarán momentos que reflejan el comportamiento peculiar de las diversas geometrías implementadas en la construcción de cada uno de ellos.

## ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN

A diferencia del fenómeno de la radiación, donde lo esperado es lograr el mayor bloqueo del flujo solar que incide en una fachada, la iluminación trata sobre el manejo de la componente lumínica solar por medio de su redistribución dentro del espacio que desea ser iluminado. Aspectos importantes de su tratamiento tienen que ver con evitar grandes contrastes que provoquen deslumbramiento, permitiendo además que se iluminen zonas que están poco vinculadas a los vanos de la envolvente del edificio.

De esta manera, la radiación y la luz son componentes solares que deben ser tratados de distinta forma para lograr su máximo beneficio en términos de mejoramiento del ambiente interior.

Para evaluar el potencial de mejora ambiental interior del sistema en términos del manejo de la luz se desarrollaron gráficos de distribución lumínica (FIG. 8) que presentan el promedio diario de iluminación para tres zonas del interior de los laboratorios. Las zonas destacadas son: zona frente, zona media y zona fondo.

En los gráficos de resultados se observa que ninguno de los prototipos logra un manejo de la luz, ya que todos tienen un comportamiento similar a lo que se grafica para la muestra de referencia.

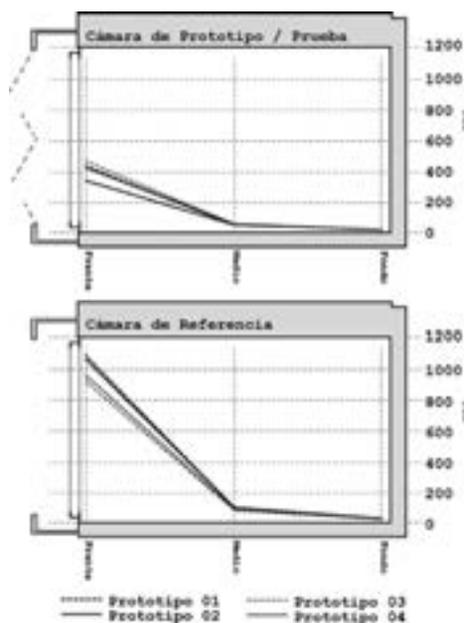


FIG. 08

La diferencia más destacable entre la muestra de referencia y los prototipos construidos es que estos últimos tienden a disminuir los valores de iluminación en todas las zonas, como lo haría una pantalla o sistema de bloqueo solar homogéneo. Sin embargo, este no es un efecto deseado, ya que se espera una tendencia a disminuir los valores de iluminación en el frente y aumentarlos en el fondo para alcanzar una distribución homogénea de la luz en el espacio.

## SÍNTESIS DE RESULTADOS

El estudio de laboratorio de prototipos móviles de fachada demostró que, en cuanto a radiación, el sistema logra un manejo efectivo que resulta en una respuesta dinámica a las condiciones constantemente variables del exterior. Esta respuesta se asocia específicamente al parámetro ambiental de radiación incidente registrado al exterior, el que permite generar un movimiento que protege constantemente al interior. Este resultado se vincula directamente al principio mecánico utilizado, ya que es el único elemento común implementado en la construcción de todos los prototipos. Las leves diferencias en el comportamiento de cada solución móvil que fue propuesta se asocian a las distintas configuraciones geométricas en cada prototipo.

En cuanto a la iluminación, no se logró ningún efecto que pudiese asociarse a la consecuencia deseada del sistema de protección solar implementado. Esto se explica porque los prototipos fueron construidos en base a las lógicas de radiación, que además se vinculan al algoritmo de control que también utiliza este parámetro ambiental para accionar el movimiento. De esta manera, los prototipos siempre actúan bloqueando, sin permitir que la luz sea direccionada para su redistribución al interior del espacio. Sin embargo, este es un problema tanto geométrico como del algoritmo de control implementado, ya que el análisis de radiación demuestra que el principio mecánico alcanza un determinado potencial ambiental para la mejora del ambiente interior, cuya magnitud estará definida por los elementos que se dispongan para

ser manipulados y las formas de control o algoritmos establecidos.

Esto quiere decir que eventualmente podría mejorarse el comportamiento lumínico de los prototipos si se construyen mayores aberturas de los elementos de bloqueo, además de elaborar formas de control (algoritmo) que respondan a la luz para mejorar la condición lumínica del interior en aquellos instantes más desfavorables del día.

## EXTRAPOLACIÓN ARQUITECTÓNICA

En una investigación de corte experimental como esta, el proyecto de arquitectura se plantea como una instancia de discusión de aquellos 'otros' aspectos que intervienen en el desarrollo de una fachada variable y que trascienden los temas mecánicos y formales de una pieza particular (prototipos) para vincularse a problemáticas asociadas a la planificación de lo colectivo y repetitivo. Para esto se elabora un proyecto de arquitectura de fachada variable que, a través de la intervención de un edificio existente de envolvente vidriada, desarrolla una extrapolación arquitectónica de los hallazgos de la investigación (FIG. 9).

**Singularidad vs. estándar:** La fachada acristalada del edificio de oficinas intervenido da cuenta de una homogeneidad que se materializa por la aplicación de una solución única para todas sus orientaciones (el uso del vidrio). Si se intervinieran este tipo de fachadas con sistemas de protección solar fijos, se deberían elaborar una serie de soluciones particulares para atender la diversidad de situaciones que requieran ser resueltas a nivel de envolvente. Sin embargo, de la misma manera en que la construcción busca en el desarrollo de la técnica un grado de estandarización y adaptabilidad, el sistema de protección variable propuesto se elabora en base a un módulo único que se repite para dar respuesta a distintos escenarios de usos y operación del interior (asoleamiento, obstrucciones, orientaciones).

**Escala:** Definida en este caso por la modulación preexistente del vidrio en el edificio y la distancia de anclaje entre losa y losa, determina el grado de interacción del sistema variable con las situaciones interiores del edificio. A menor tamaño, mayor interacción con el usuario.

**Forma:** el rombo que describe la geometría general del sistema de protección resultó de dos situaciones: la posibilidad de contar con dos ejes de rotación – que permitan un giro en horizontal y en vertical – evitando a la vez que se entorpezca el movimiento entre piezas. A esto se suma una decisión de carácter estético vinculado con la idea de quebrar la ortogonalidad de la grilla resultante de la modulación del vidrio en la fachada del edificio.

Las definiciones de las características anteriores dieron forma a un proyecto de intervención de fachadas a través del desarrollo de un módulo variable, replicable en todas las áreas seleccionadas de la fachada (según sus condiciones de asoleamiento y obstrucciones), para mejorar el rendimiento térmico y lumínico a través de un sistema que media activamente con las condiciones climáticas propias del contexto en el que se sitúa el edificio intervenido.

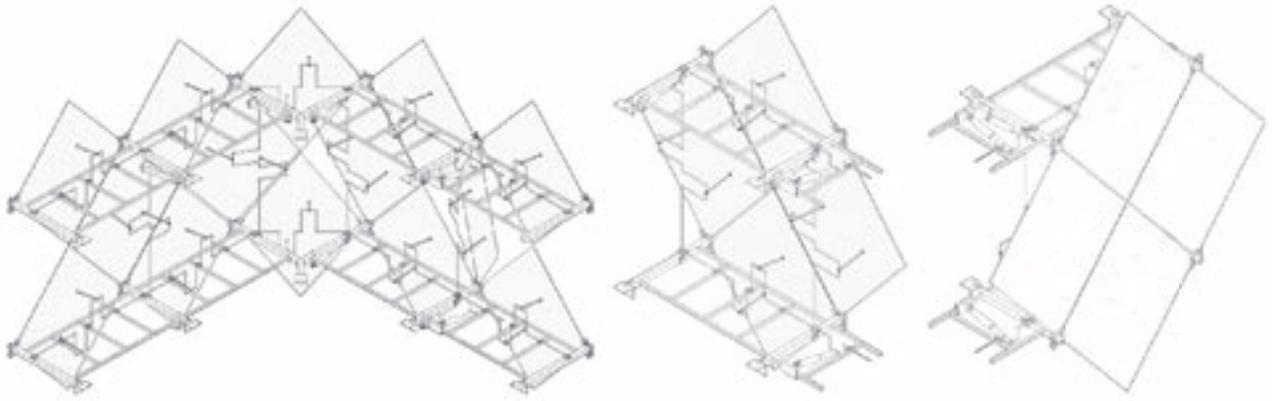


FIG. 09

## CONCLUSIONES

En cuanto a la hipótesis planteada al inicio de la investigación y basándose en los resultados de los experimentos realizados en los laboratorios, se concluye que el principio mecánico de un solo eje de desarrollo variable cuenta con el potencial ambiental para lograr acondicionar en cierta medida un edificio por medio de la movilización y manipulación de piezas dispuestas en su fachada. En los experimentos realizados se evaluó el manejo de la radiación y la iluminación que podía alcanzar un sistema de protección solar al ser manipulado por medio del principio mecánico propuesto. Aunque los resultados en iluminación no fueron lo esperado, los datos de radiación entregaron los argumentos suficientes para entender al mecanismo como pieza fundamental en la labor de alcanzar y definir un determinado comportamiento ambiental al interior del edificio por medio del movimiento de su fachada. Pero además revela la importancia del principio mecánico desarrollado en cuanto a su capacidad de adaptación a distintos tipos de elementos móviles para mantener un buen comportamiento en diversos escenarios de actuación.

## ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

A la luz del proyecto de intervención asociado a la investigación, se puede concluir que los desarrollos mecánicos llevados a cabo en torno al problema de la implementación de soluciones de fachada dinámicas corresponden a un asunto de profundo interés para la arquitectura, ya que su definición condiciona inevitablemente las posibilidades proyectuales en torno a la concepción del movimiento en el edificio.

De esta manera, los sistemas mecánicos propuestos para el desarrollo de una arquitectura del movimiento deben ser concebidos desde la perspectiva de su adaptabilidad y versatilidad para permitir así una amplia gama de resultados en cuanto a las soluciones geométricas que puedan ser manipuladas, pero apelando a la sencillez que permita un uso irrestricto de este tipo de soluciones. Sin embargo, esto no sirve de nada mientras la arquitectura no esté enterada de los alcances proyectuales que los componentes mecánicos pueden conseguir.

El módulo variable (aplicado al caso de estudio) que fue desarrollado en esta investigación sirve como ejemplo para graficar los alcances de este tipo de desarrollos cuando la arquitectura se hace parte en su elaboración. En primer lugar, el principio mecánico de un solo eje de desarrollo variable corresponde a la materialización de la simpleza y versatilidad que debería alcanzar todo sistema mecánico. Estas mismas características son trasladadas a la propuesta del módulo variable en el marco de la formulación del proyecto de arquitectura de esta investigación. En cuanto a las características de este módulo se destacan:

a. El reconocimiento del problema de la variabilidad necesaria para enfrentar diversas situaciones propias del emplazamiento y el dinamismo de las condiciones climáticas, siendo enfrentadas por medio de una solución única que incorpora el movimiento.

b. Resuelve el problema de lo variable desde su impacto constructivo, planteando una solución que evade la ejecución de faenas complejas en la obra y resolviendo todo con una solución estándar que por medio del movimiento logra alcanzar lo múltiple en la envolvente del edificio.

c. Lo versátil de la solución permite que el sistema se implemente desde una automatización absoluta hasta su aplicación de manera fija, pasando por soluciones de movimiento acotado, semiautomático o de manipulación manual, lo cual dependerá de las pretensiones propias del proyecto.

d. La fácil asociación entre módulos variables que, aunque permite un trabajo colectivo eficaz, también está resuelto desde su sustracción para admitir la supresión de módulos en la fachada con el objetivo de lograr calidades espaciales específicas propias de cada proyecto

De esta manera, la definición de estas características permitió aplicar este módulo variable a un edificio existente, donde las intervenciones se realizaron de manera acotada para responder de forma adecuada a su situación de absoluta exposición a las condiciones climáticas, en particular de asoleamiento.

Es así como el cruce entre el proyecto y la técnica parece ser el camino fundamental para lograr que la arquitectura avance en la incorporación del movimiento para hacer frente a la amplia gama de situaciones que deben ser atendidas en pos de temperar el espacio interior de lo construido.

## ESTUDIOS FUTUROS

La investigación desarrollada se vio enfrentada a una serie de aspectos que están involucrados en el desarrollo del movimiento en la arquitectura, pero que, al no ser parte de los objetivos de este trabajo, se presentan como posibilidades de desarrollos futuros que permitan seguir avanzado en esta misma línea.

En cuanto al algoritmo de control, se pudo entender su importancia, ya que define las variables ambientales que serán tomadas en cuenta para activar la respuesta mecánica de un sistema de protección variable. En los experimentos realizados en torno al principio mecánico desarrollado sólo se consideró la radiación para controlar el sistema, lo que se tradujo en una respuesta insuficiente en cuanto al tratamiento de la luz. Por esto cabe preguntarse: ¿cuáles son las variables ambientales que deben ser consideradas para la manipulación de un sistema de movimiento de acondicionamiento ambiental?, y ¿cómo se evalúa su relevancia en términos específicos del proyecto que se desea abordar?

En cuanto a las geometrías de protección solar, estas se abordaron en tanto permitieron demostrar un determinado comportamiento del principio mecánico propuesto al manipular distintas configuraciones de los elementos móviles de sombreado. Sin embargo, queda pendiente construir una clasificación que permita asociar determinados tipos y formas de movimientos a resultados específicos en cuanto a eficiencia y acondicionamiento del espacio interior, distinguiendo

además su pertinencia en términos de ubicación y orientación en la fachada.

Finalmente, la simulación del movimiento sólo se mencionó en la discusión del estado del arte, dando cuenta de un escaso desarrollo. Por lo tanto, se plantea como una posible línea de investigación futura el desarrollo de métodos de simulación cercanos a la arquitectura que permitan previsualizar los resultados de un determinado sistema de movimiento propuesto con el objetivo de anticiparse a las implicancias que podrían tener estos sistemas en el proyecto.

## NOTAS

1 Se entiende por sistema arquitectónico a aquel ideal de configuración válido. Más allá de esta base, y de manera más nebulosa, no hay nada permanente, sólo hay cambio. La relación entre el todo y las partes y de las partes entre sí está dictada por la idea dominante del sistema, aunque esto no impide que las variaciones sean infinitas" (Moloney, 2011).

## REFERENCIAS

BAKKER, L.G.; HOES-VAN OEFFELEN, E.C.M.; LOONEN, R.C.G.M.; y HENSEN, J.M.L. "User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study". *Building and Environment* 78 (2014): 44-52.

HANSANUWAT, Ryan. "Kinetic Facades as Environmental Control Systems: Using Kinetic Facades to Increase Energy Efficiency and Building Performance in Office Buildings." University of Southern California, 2010.

HAUSLADEN, Gerhard; Michael DE SALDANHA; y Petra LIEDL. *ClimateSkin: Building-Skin Concepts That Can Do More with Less Energy*. Basel: Birkhäuser, 2008.

IBAÑEZ-PUYA, María; César MARTÍN-GÓMEZ; Marina VIDAUREE-ARBIZUA; y J.A. SACRISTÁN-FERNÁNDEZ. "Theoretical Design of an Active Façade System with Peltier Cells". *Energy Procedia* 61 (2014): 700-703.

MEAGHER, Mark. "Designing for change: The poetic potential of responsive architecture". *Frontiers of Architectural Research* 4, 2 (2015): 1-7.

MOLONEY, Jules. *Designing kinetics for architectural facades: state change*. London: Routledge, 2011.

PERINO, Marco; Favoino, Favio; Goia, Francesco; y Serra, Valentina. "Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module". *Energy and Buildings* 68 (2013): 647-59.

TANAKA, H.; Y. SHIBUTANI; S. IZUMI; y S. SAKAI. "Planar mobility modes of 8-bar-jointed structures with a single degree of freedom". *International Journal of Solids and Structures* 49 (2012): 1712-22.

TZEMPELIKOS, Athanassios y Andreas K. ATHIENITIS. "The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand". *Solar Energy* 81, No. 3 (marzo de 2007): 369-82.

VÁSQUEZ, Claudio; Felipe ENCINAS; y Renato D'ALENÇON. "Edificios de oficinas en Santiago: ¿Qué estamos haciendo desde el punto de vista del consumo energético?". *ARQ* No. 89 (abril de 2015): 50-61.

NIELSEN, Martin Vraa; Svend SVENDSEN; y Lotte BJERREGAARD JENSEN. "Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight". *Solar Energy* 85 (2011): 757-68.

VÁSQUEZ, Claudio. *El vidrio: Arquitectura y técnica*. Santiago: Ediciones ARQ, 2006.

## IMÁGENES

**Fig. 01** Sistemas arquitectónicos de composición.  
Emil Kaufmann.

Fuente: Redibujo de los autores a partir de: Moloney, Jules, 2011. "Designing kinetics for architectural facades: state change"

**Fig. 02** Ilustración de los tres tipos de protección solar. Nielsen, Svendsen, y Jensen, 2011.

Fuente: Redibujo de los autores a partir de: "Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight"

**Fig. 03** Sistema de protección solar tipo roller exterior.

Fuente: Elaboración propia para ilustrar estudio de Tzempelikos et al.

**Fig. 04** Gráficos de resultados: prototipos de celosías.

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 05** Diagrama de la configuración mecánica que manipulará el movimiento.

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 06** Prototipos construidos para el estudio.

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 07** Gráficos de resultados de radiación transmitida para cada prototipo estudiado.

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 08** Gráfico que da cuenta del comportamiento de la luz en su propagación hacia el interior de la planta.

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 09** Proyecto de intervención de un edificio existente con un sistema de protección solar variable en base al principio mecánico propuesto.

Fuente: Elaboración propia