

Prototipo de envolvente responsiva

Responsive envelope prototype

Leandro Corporan¹, José Antonio Constanzo², Julio Peña³ 

- ¹ Arquitecto por la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (proceso de graduación). Le apasiona el diseño asistido por programación y la fabricación digital. Actualmente, trabaja como arquitecto en el Ministerio de Agricultura y monitor de fabricación digital en la UNPHU. Ha trabajado en Estudio Caribe como pasante y con el equipo de LabUA+ como maquetista. República Dominicana. Correo electrónico leandro.corporan@gmail.com
- ² Arquitecto. Docente en UNPHU desde 1992, posee una maestría Internacional en Gestión Universitaria y otra Gerencia de Proyectos, además posee experiencia en el área de proyectos arquitectónicos y urbanos. República Dominicana. Correo electrónico jc2438@unphu.edu.do
- ³ Arquitecto egresado de la Universidad Autónoma de Santo Domingo, en 1985. Estudios a nivel de maestría en Arquitectura Tropical Caribeña (UNPHU-2019), Master Internacional en Gestión Universitaria, Universidad de Alcalá de Henares, España. Máster en Planificación y Administración de la Educación, Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, 2002. Diplomado en arquitectura Bioclimática, OPS – Politécnico José Antonio Echavarría, Cuba. 2001. Es miembro de la Carrera Nacional de Investigadores en Ciencia, Tecnología e Innovación, 2020, MESCYT e investigador de la escuela de Arquitectura y Urbanismo de la Facultad de Arquitectura y Artes. República Dominicana. Correo electrónico jupena@unphu.edu.do

Resumen: Las nuevas tecnologías han permitido el uso de nuevos materiales, que, en conjunto a la fabricación digital, aportan al desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. Gracias al visual scripting aplicado al diseño de fachadas de los edificios, surgen los elementos arquitectónicos responsivos, creando nuevos niveles de interacción con el ser humano que habita el espacio diseñado de esta forma. Se plantea la creación de un prototipo de envolvente responsiva que sea replicable y sirva para diversas aplicaciones arquitectónicas. Este podría ser capaz de responder a factores climáticos u otros estímulos, debido a que posee elementos móviles que se pueden programar para estos fines, además, servir también como elemento estético. Generar un prototipo funcional de envolvente responsiva involucra distintas áreas del conocimiento. Partiendo de la arquitectura como pilar principal para el diseño, se incluye la programación para automatizar el factor responsivo de la envolvente, además de la fabricación digital, y como se involucran la materialidad y manufactura del objeto.

Palabras claves: Envolvente, tecnología, clima, análisis, reacción, control.

Abstract: New technologies have enabled the use of innovative materials which, combined with digital fabrication, contribute to the development of new architectural solutions. Through visual scripting applied to building façade design, responsive architectural elements emerge, creating new levels of interaction with the human occupants of these spaces. This research proposes the development of a responsive envelope prototype that is replicable and adaptable to various architectural applications. This prototype could respond to climatic factors or other stimuli, as it incorporates movable elements that can be programmed for these purposes while also serving as an aesthetic component. Developing a functional responsive envelope prototype involves multiple disciplines. Architecture serves as the foundation for the design, while programming is integrated to automate the envelope's responsiveness. Additionally, digital fabrication plays a crucial role in defining the materiality and manufacturing process of the system.

Keywords: Envelope, technology, climate, analysis, reaction, control.

Citación: Corporan, L.; Constanzo, J.A.; Peña, J.; Prototipo de envolvente responsiva. *Entrópico* 2025, 3, 1. <https://doi.org/10.33413/eau.2025.404>

Editor académico: Heidi De Moya Simó y Gilkauris Rojas Cortorreal.

Recibido: 05/03/2025

Aceptado: 17/03/2025

Publicado: 01/04/2025



Copyright: © 2022 por los autores. Enviado para una posible publicación de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En la actualidad existen herramientas tecnológicas que hacen posible la evolución de soluciones convencionales de envolvente. Permitiendo lograr resultados innovadores y útiles, que podrían ser más eficaces en la resolución de problemáticas arquitectónicas. Además de introducir una forma diferente practicar la arquitectura.

“Desde la invención de la rueda hasta la última actualización del Metaverso, el avance de la tecnología siempre impulsó la arquitectura hacia nuevos horizontes que antes parecían imposibles de conquistar. En tan solo un par de décadas, la era digital transformó el diseño, la comercialización y hasta la propia experiencia humana de habitar y relacionarse con el espacio en todas nuestras esferas de vida.” (Estudio Gómez Platero, 2024)

El ser humano, desde sus orígenes, ha sido un ser que se adapta y aprovecha su entorno, creando herramientas que evolucionan para satisfacer sus necesidades. La arquitectura responsiva surge como consecuencia de esta evolución, ya que la tecnología permite ofrecer nuevas soluciones a necesidades actuales.

“La estética sólo nos interesa si podemos explorar nuevas técnicas, formas y materiales en los edificios, porque no sólo disfrutamos de los resultados sino de los procesos para llegar a ellos” Iñaki Ábalos. (Uribe, 2016)

La envolvente responsiva busca crear una relación dinámica entre el edificio y su entorno, apoyada en el visual scripting, el cual utiliza una interfaz gráfica en lugar de código, permitiendo a los arquitectos explorar y evaluar diferentes opciones en tiempo real y responder a factores variables tanto del entorno como de preferencias de diseño.

Esta clase de tecnología comienza a desarrollarse en República Dominicana. No obstante, actualmente la investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras y su aplicación en la arquitectura dominicana aún es primitiva.

Se plantea la creación de un prototipo de envolvente responsiva que sea replicable y sirva para diversas aplicaciones arquitectónicas. Este podría ser capaz de responder a factores climáticos u otros estímulos, debido a que posee elementos móviles que pueden programarse para estos fines, además de servir como elemento estético.

Generar un prototipo funcional de envolvente responsiva involucra distintas áreas del conocimiento. Partiendo de la arquitectura como pilar principal para el diseño, se incluye la programación para automatizar el factor responsivo de la envolvente, además de la fabricación digital y el estudio de la materialidad y manufactura del objeto.

2. Métodos

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño descriptivo, aplicado y de campo, orientado al análisis del desempeño climático de un prototipo de envolvente responsiva. Para evaluar su impacto, se emplearon tanto simulaciones computacionales como mediciones de campo, lo que permitió analizar su comportamiento en distintas condiciones y su interacción con el entorno construido.

El enfoque descriptivo permite una observación detallada y sistemática de las características de la envolvente responsiva, identificando sus estrategias y tecnologías, así como sus beneficios y limitaciones. carácter aplicado del estudio garantizó que los hallazgos tuvieran una orientación práctica, buscando soluciones viables y replicables en el diseño arquitectónico. Además, las mediciones de campo permiten contrastar los resultados obtenidos en simulaciones con mediciones reales, asegurando una validación empírica del comportamiento del prototipo en condiciones climáticas específicas.

- Paso 1. Identificación del problema.
- Paso 2. Análisis Climático de Santo Domingo, identificando sus características.
- Paso 3. Comparación de clima de Santo Domingo vs otras ciudades con envolventes similares, con el fin de identificar posibles relaciones entre el clima y el diseño de las envolventes.
- Paso 4. Evaluación del edificio a estudiar para determinar la fachada a intervenir.

- Paso 5. Construcción de modelos tamaño (0.5 x 0.5m y 0.5 x 1m) que simulan el área a evaluar. Se analizaron dos variables; fachada y orientación, mediante la instrumentación con Arduino, permitiendo la recopilación de datos sobre las condiciones climáticas en el interior de los modelos. Las mediciones fueron tomadas en un lapso de 12 días (4 al 16 de julio 2024), tiempo suficiente para obtener conclusiones con una cantidad de datos controlada. Utilizadas como punto de partida para entender la relación de la posición de los paneles, con las variaciones climáticas interiores.
- Paso 6. Realizar un análisis climático específico en la parte del edificio seleccionada, utilizando simulaciones en Grasshopper – Ladybug para identificar necesidades y comportamientos térmicos. Obteniendo el panorama climático actual de la edificación.
- Paso 7. se realizaron simulaciones aplicando la envolvente en la edificación, para observar la interacción entre la fachada modificada y el comportamiento climático, considerando factores como el recorrido del sol y la radiación solar total. Para estudiar como la envolvente responsiva incide directamente en el edificio, y si esta soluciona las necesidades climáticas para el confort.

3. Resultados

3.1. Envolvente Responsiva

Una envolvente responsiva es aquella que cambia dinámicamente en lugar de ser estática o fija, lo que permite que se produzca movimiento en la superficie de un edificio. Esto ayuda a crear lo que el arquitecto Buckminster Fuller llamó un efecto de “articulación similar a la piel”, y es una extensión de la idea de que la envolvente de un edificio es un sistema activo en lugar de un simple contenedor. (Designing Buildings, 2021)

La envolvente responsiva en arquitectura se refiere al diseño una envolvente, o fachada, que se adapta y responde activamente a estímulos como condiciones climáticas, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y el confort de los ocupantes.

3.1.1. Breve historia y evolución

La envolvente responsiva es un concepto relativamente nuevo en la arquitectura, con la idea de crear edificios que sean capaces de responder a los cambios en el clima u otros estímulos, de modo que los ocupantes estén siempre cómodos y el consumo de energía se reduzca.

El origen de la envolvente responsiva se remonta a la década de 1970, cuando se empiezan a desarrollar técnicas de construcción y materiales de construcción más eficientes desde el punto de vista energético.

A fines de los años 70, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado denominados Sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air-Conditioning) fueron los primeros sistemas de edificios electrónicamente controlados. Los chips de las computadoras permitieron el control de estos sistemas a través de sensores localizados, permitiendo respuestas a alteraciones rápidas y más precisas de las condiciones climáticas.

Esta tecnología fomentó la idea de dotar a los edificios de inteligencia, que era capaz de responder ante los requerimientos ambientales pero sus sistemas carecían de integridad. La inteligencia se asociaba básicamente a la automatización. (Arqhys Decoración, 2011)

Sin embargo, la verdadera revolución llegó en la década de 1990, cuando la tecnología de sensores y sistemas de control se volvieron más asequibles.

En los años 90, se desarrollaron los primeros sistemas de control inteligente para edificios, que utilizaron sensores para medir las condiciones ambientales y ajustar automáticamente la iluminación, la calefacción y la ventilación para mantener un ambiente interior confortable. Estos sistemas también permitían a los ocupantes controlar las condiciones ambientales en sus propias habitaciones, lo que les daba una mayor sensación de control sobre su entorno.

Desde entonces, la envolvente responsiva ha seguido evolucionando, con la introducción de nuevas tecnologías como vidrios inteligentes y sistemas de sombreado dinámico. Los edificios modernos

están diseñados para ser altamente eficientes desde el punto de vista energético, con materiales de construcción de alta tecnología que ofrecen aislamiento térmico y acústico avanzado.

La envolvente responsiva también se ha vuelto cada vez más importante a medida que los edificios han adoptado un enfoque más sostenible. Al diseñar edificios que respondan a las condiciones ambientales de manera eficiente, se puede reducir significativamente el consumo de energía y minimizar la huella de carbono del edificio.

3.1.2. Importancia y aplicaciones

- **Eficiencia energética mejorada:** las fachadas cinéticas pueden ayudar a reducir el consumo de energía en los edificios al regular la temperatura y los niveles de luz. Por ejemplo, las fachadas retráctiles y transformables pueden adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes, mientras que las fachadas sensibles pueden optimizar los niveles de luz natural y reducir la necesidad de iluminación artificial.
- **Experiencia de usuario mejorada:** las fachadas cinéticas pueden crear una experiencia memorable e inmersiva para los usuarios del edificio. Las fachadas dinámicas pueden proporcionar un paisaje visual en constante cambio, mientras que las pantallas cinéticas y las fachadas receptivas pueden permitir la interacción y el compromiso del usuario.
- **Mayor sostenibilidad:** Al reducir el consumo de energía y mejorar la experiencia del usuario, las fachadas cinéticas pueden contribuir al diseño y operación de edificios sostenibles.
- **Identidad de marca y marketing:** las fachadas dinámicas y visualmente atractivas pueden ayudar a promover la identidad de marca de un edificio u organización y atraer clientes o visitantes.

3.2. Aspectos tecnológicos de una envolvente responsiva

3.2.1. Componentes de un sistema de Envolvente Responsiva

- **Sensores:** Se utilizan para detectar cambios en el entorno, como cambios en la luz, la temperatura, el viento o la interacción del usuario. Estos sensores proporcionan información al sistema de control, que determina cómo debe moverse la fachada en respuesta al entorno.
- **Actuadores:** Son los dispositivos que proporcionan el movimiento mecánico a los paneles de fachada. Los actuadores pueden ser motores eléctricos, sistemas hidráulicos o sistemas neumáticos, según el diseño del sistema.
- **Sistema de control:** El sistema de control es responsable de recibir información de los sensores y determinar cómo debe moverse la fachada en respuesta al entorno. El sistema de control suele utilizar algoritmos y software para gestionar el movimiento de los paneles de fachada.
- **Fuente de alimentación:** Es la encargada de proporcionar los distintos voltajes que cada componente requiere. Todos los dispositivos que necesiten una corriente continua, deben tener una fuente de alimentación entre ellos y la corriente eléctrica. (Electronic Board, 2021)
- **Sistema Estructural:** La estructura proporciona el soporte y la estabilidad necesarios para la envolvente. Por lo general, está hecho de materiales duraderos y está diseñado para resistir el viento, el clima y otros factores ambientales.
- **Cerramientos:** Estos son los elementos que configuran el exterior visible del edificio. En un sistema de envolvente responsiva, estos están diseñados para moverse y cambiar de posición.

3.3. Software aplicable al desarrollo de una Envolvente Responsiva

3.3.1. Visual Scripting

Visual Scripting es una herramienta designada a bajar la barrera de entrada de programación. Como el código es más visual, necesita menor pensamiento abstracto para comprenderlo. Cualquier artista, animador, diseñador, etc. puede mirarlo y comprender el flujo de la lógica. (Godot Engine, 2023)

La mayor ventaja es que elimina la necesidad de aprender un lenguaje de programación para crear componentes y procesos personalizados. El diseñador se convierte en el programador de sus propias herramientas, lo que le permite desarrollar flujos de trabajo a medida y componentes personalizados que se adaptan a su propia forma de trabajar y a los tipos de proyectos en los que trabaja habitualmente. Esto proporciona a los arquitectos e ingenieros la flexibilidad y la creatividad que necesitan durante el diseño para crear estructuras adecuadas de la forma más eficiente.

El visual scripting es ideal para el modelado paramétrico de formas complejas, la creación de objetos personalizados de uso frecuente y la automatización de los flujos de trabajo. Una vez definidos todos los parámetros, y se han establecido las relaciones entre componentes o actividades, Como resultado, se necesitará de menos tiempo para implementar cambios cuando se requieran, ya que los componentes se actualizan automáticamente en base a las definiciones predeterminadas. (ALLPLAN, 2023)

3.3.2. Diseño Paramétrico

En su definición más simple desde una perspectiva arquitectónica, la arquitectura paramétrica de un edificio es crea un sistema de parámetros o variables y un conjunto de restricciones en base a unos datos iniciales introducidos en un software para producir versatilidad en los resultados (por ejemplo, una forma geométrica de un cubo) que puede ser modificada cambiando las variables (También se denomina diseño generativo – Generative Design según quién lo mire). (Segui, 2022)

Por lo general, los softwares que se implementan para esta modelación de tipo avanzada en 3D y diseño generativo son Rhinoceros y Grasshopper.

Lo más probable es que la mayoría de los arquitectos estén al tanto de Rhinoceros como software que permite la modelación en 3D de manera intuitiva y precisa, sin embargo, Grasshopper resulta ser un software más nuevo o desconocido. Grasshopper es un plug in de Rhinoceros, orientado al diseño paramétrico que funciona como editor de algoritmos generativos. Las ventajas de este programa son que, a diferencia de muchos, con este no se necesita experiencia en programación o scripting, lo cual permite crear diseños paramétricos a partir de componentes generadores, obteniendo una considerable optimización de tiempo. (Molinare, 2011)

Según Alexandra Molinare, en su artículo ¿Qué es el diseño paramétrico?, se describen las siguientes pautas para realizar un diseño paramétrico:

- Diseñar un proceso y no un resultado concreto: Al diseñar un proceso desarrollamos una colección de relaciones matemáticas y geométricas creando procesos y sistemas (algoritmos), los cuales nos permiten explorar más de un resultado, con ciertas premisas de diseño establecidas previamente.
- Posibilidad de relacionar variables / parámetros: Teniendo un proceso de diseño y no una forma preestablecida se pueden manipular sus variables y propiedades, las cuales podemos modificar en tiempo real y así comparar resultados, con la finalidad de tener un resultado más eficiente.
- Resultados paramétricos y/o responsivo a condiciones establecidas previamente: A partir del diseño paramétrico se puede generar diseños inteligentes y/o responsivos estableciendo un criterio de diseño (exploración de formas), permitiendo adaptarse a cualquier situación, contexto, tectónica, etc. Es decir, se puede adaptar el diseño a cualquier parámetro / variable que sea integrado al proceso de diseño, dando un resultado inteligente y responsivo que logra satisfacer un problema específico.

- Fabricación digital: Una de las ventajas del diseño paramétrico es que permite integrar la fabricación digital directamente al diseño, ya que se integra la producción digital por medio de máquinas de control numérico o impresoras 3D. Así es como con la producción digital se optimiza el tiempo y costos de producción, ya que aplica los conceptos básicos de la prefabricación.

3.3.4. Simuladores

- Simulación de mecánica: La simulación de mecánicas es el proceso de crear una representación virtual de un sistema mecánico con el fin de analizar su comportamiento.
- Simulación de flujo de aire y calor: Un simulador de flujo de aire y calor es una herramienta informática que se utiliza para predecir el comportamiento del flujo de aire y la transferencia de calor en un sistema determinado, como un edificio o una sala.
- Simulación energética: Permite evaluar el desempeño energético de los edificios, de acuerdo con sus propiedades arquitectónicas, sus condiciones de uso y las características climáticas del sitio. En ese sentido, las simulaciones energéticas pueden ser muy útiles para conocer el impacto de nuestras decisiones de diseño respecto a variables como la forma, la orientación, la cantidad y tipo de acristalamiento, el uso de dispositivos de sombreado, el nivel de aislamiento o la configuración de los sistemas de climatización, por citar algunas. (Sol.Arq, 2023)
- Simulación De Iluminación: Implica la utilización de software especializado para modelar y analizar la iluminación natural y artificial en un edificio o espacio arquitectónico.

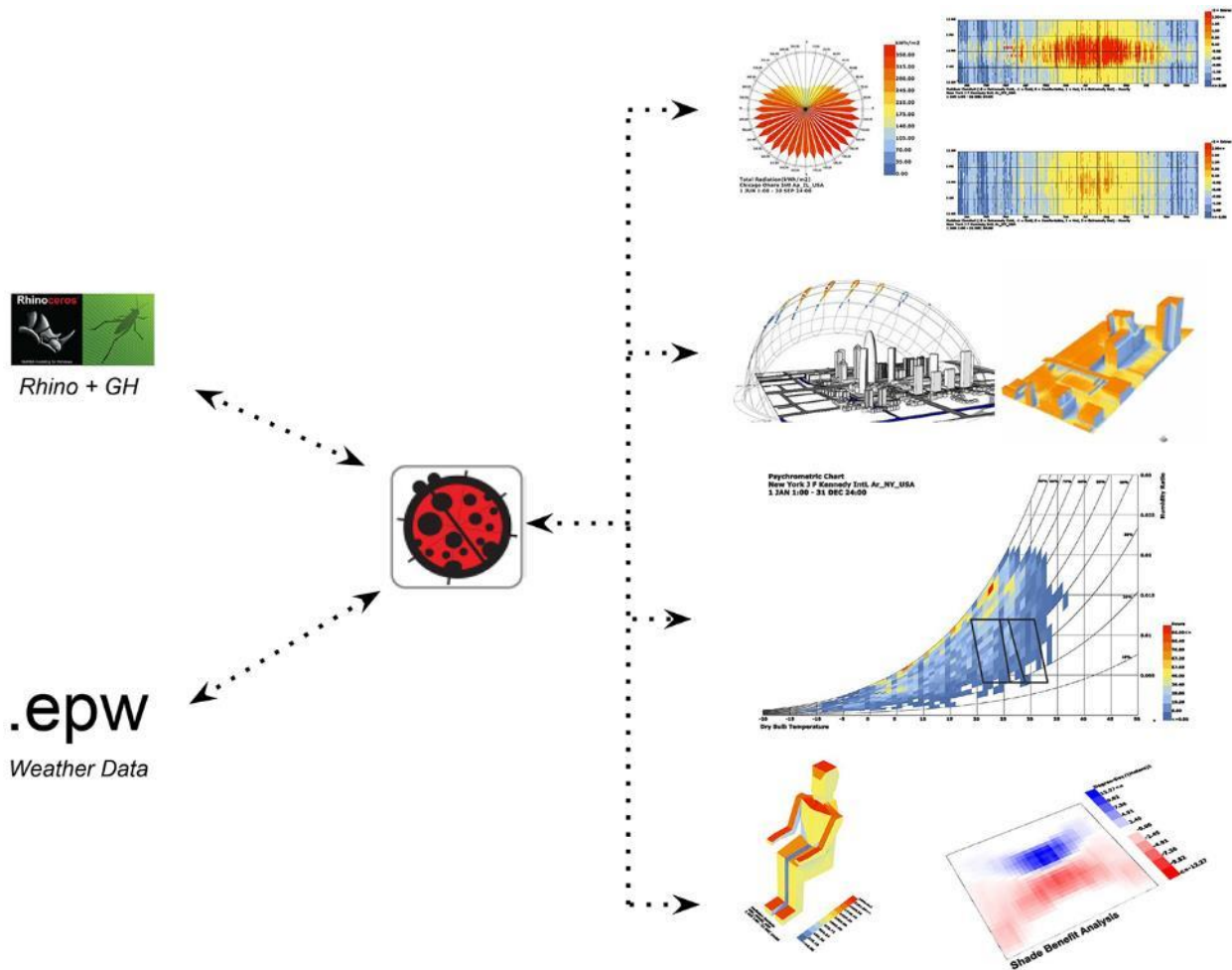


Figura 1. Diagrama de Funcionamiento LadyBug. Imagen propiedad de: Ladybug Tools.

3.4. Mantenimiento y durabilidad

El mantenimiento de fachadas sirve fundamentalmente para preservar la envolvente del edificio, que es el segundo punto caliente de las construcciones en cuanto a aparición de patologías, después de la cubierta. No se trata solamente de conservar el edificio en sí, sino de velar por la vida y la salud de las personas que se hallen en sus inmediaciones. (certicalia, 2018)

- **Inspección regular:** La envolvente responsiva debe ser inspeccionada regularmente para detectar posibles problemas, como fugas de aire, daños en las superficies, deformaciones o desgaste excesivo. Esto ayudará a prevenir problemas mayores y costosos en el futuro.
- **Limpieza:** La limpieza regular es esencial para mantener la integridad de la envolvente responsiva. Los componentes móviles como los paneles o cortinas deben ser limpiados para evitar que se obstruyan o dañen. Es importante seguir las instrucciones del fabricante para la limpieza de cada componente.
- **Reparación y reemplazo:** Si se detectan problemas durante la inspección, es importante repararlos o reemplazarlos de inmediato. El reemplazo de los componentes de la envolvente puede ser costoso, pero puede ahorrar dinero a largo plazo al mejorar la eficiencia energética y reducir los costos de mantenimiento.
- **Mantenimiento preventivo:** El mantenimiento preventivo puede ayudar a evitar problemas y garantizar la durabilidad de la envolvente responsiva. Esto incluye la lubricación de los componentes móviles, la verificación de los sellos de las juntas y el ajuste de los sistemas de control automático.
- **Capacitación del personal:** Es importante que el personal encargado del mantenimiento de la envolvente responsiva esté capacitado para realizar la tarea de manera efectiva y segura. El personal debe conocer los procedimientos de mantenimiento adecuados y estar al tanto de las últimas tecnologías y técnicas de mantenimiento.

3.5. Rendimiento de la envolvente responsiva

3.5.1. Eficiencia energética

El comportamiento energético de los edificios depende del intercambio de calor que se produce entre los espacios interiores habitables y el ambiente exterior a través de su envolvente. Dicha envolvente se compone de todos los cerramientos del edificio. Además, su eficiencia energética depende de su adecuado diseño y ejecución. Todo ello, teniendo en cuenta la zona climática donde se ubica el edificio y su perfil de uso. (Revista Mundo HVAC&R, 2018) La envolvente responsiva mejora la eficiencia energética de los edificios. Permitiendo la entrada de luz y aire, pero también permiten la pérdida de calor y energía. Esta reduce la pérdida de energía al ajustar dinámicamente las propiedades térmicas de la envolvente en respuesta a las condiciones externas e internas.

3.5.2. Iluminación Natural

El ser humano tiene tiende a dar mucha importancia a la luz, ya que aproximadamente el 80% de la información que recibe viene de sus ojos. La visión no es una acción pasiva en respuesta a los objetos iluminados, es una acción de procesar la información y enfocar en los detectores de luz de la retina del ojo. Esta información es almacenada y transferida a través del nervio óptico hacia el cerebro para su interpretación. La visión es por lo tanto dependiente de la luz y del sistema visual. (Moore, 1989) En términos de iluminación natural, la envolvente responsiva se refiere a la capacidad de un edificio para controlar y maximizar la entrada de luz natural, lo que puede tener un impacto significativo en el rendimiento energético y en la calidad de vida de los ocupantes. Esta depende de factores, como la orientación del edificio, la ubicación geográfica, la forma y tamaño, la presencia de elementos de sombreado y la calidad de los materiales de construcción. Al considerar estos factores, se puede diseñar una envolvente que permita la entrada óptima de luz natural durante todo el año, al tiempo

que reduce la necesidad de iluminación artificial. El rendimiento de una envolvente responsiva en cuanto a la iluminación natural puede ser evaluado mediante herramientas de simulación de iluminación, que permiten prever y evaluar el impacto de diferentes diseños de envolvente en el nivel de iluminación interior y en la carga energética del edificio.

3.5.3. Rendimiento Térmico

El rendimiento térmico expresa la cantidad de calor que atraviesa una superficie por unidad de área y de diferencia de temperatura. Cuanto menor sea el valor del coeficiente de transmisión térmica, mayor será el aislamiento térmico de la envolvente. El rendimiento térmico depende del diseño, la orientación, el material, el espesor y la disposición de los elementos constructivos que conforman la envolvente.

3.5.4. Rendimiento Acústico

El rendimiento acústico de la envolvente expresa la diferencia entre el nivel de presión sonora incidente y el nivel de presión sonora transmitido a través de una superficie. Cuanto mayor sea el valor del índice de reducción sonora, mayor será el aislamiento acústico de la envolvente. El rendimiento acústico depende del material, el espesor, la densidad y la elasticidad de los elementos constructivos que conforman la envolvente. Algunas estrategias para mejorar el rendimiento acústico son: utilizar materiales con alta masa o rigidez, incorporar materiales absorbentes o amortiguadores en las capas intermedias, crear discontinuidades o discontinuidades en las superficies que eviten la transmisión directa del sonido, o emplear sistemas activos o pasivos que regulen la apertura o cierre de huecos según las necesidades acústicas.

3.5.5. Desafíos técnicos y económicos

La implementación de una envolvente responsiva en un edificio puede presentar varios desafíos técnicos y económicos. En cuanto a los desafíos técnicos, la implementación de una envolvente responsiva requiere de tecnologías avanzadas de automatización y control, sensores, materiales y sistemas de gestión de energía. Estos sistemas deben ser diseñados e integrados cuidadosamente para garantizar su correcto funcionamiento y maximizar su eficiencia energética. Además, estos sistemas deben ser lo suficientemente flexibles para adaptarse a las necesidades cambiantes de los usuarios y las condiciones ambientales. En cuanto a los desafíos económicos, la implementación de una envolvente responsiva puede ser costosa en comparación con las envolventes tradicionales. Los costos de instalación y mantenimiento de los sistemas de automatización, sensores y materiales pueden ser significativamente más altos que los de los sistemas convencionales. Además, los costos de energía pueden variar ampliamente según el clima y la ubicación del edificio, lo que puede afectar la rentabilidad de la inversión a largo plazo. A pesar de estos desafíos, la implementación de una envolvente responsiva puede ofrecer varios beneficios, como una mayor eficiencia energética, una reducción de los costos de energía a largo plazo, una mejora en el confort de los usuarios y una reducción en la huella de carbono del edificio.

3.6. Proyectos de Referencia

3.6.1. Al Bahar Towers.

Arquitecto: Abdulmajid Karanouh, Aedas Arquitectos.

Fecha: 2009-2012

Ubicación: Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos.

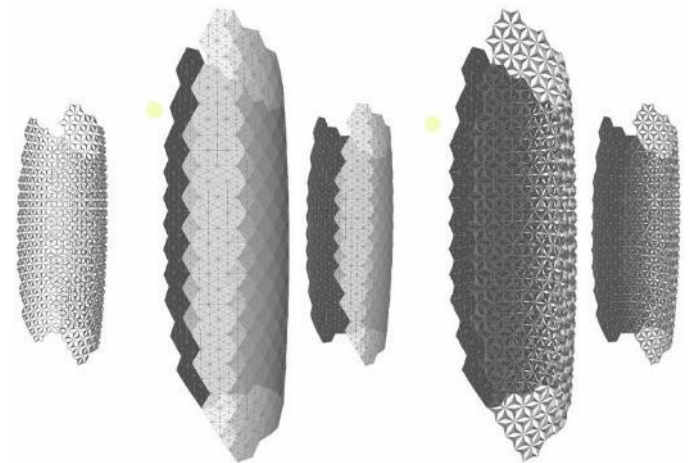
El proyecto consiste en dos torres de 150 metros de altura que comparten un podio compuesto por un basamento de dos plantas de altura. La piel de las torres, que es de vidrio, se cubre mediante un sistema de protección solar móvil en las orientaciones Este, Oeste y Sur. La doble piel protege allí donde es más necesario, pero además permite una apertura graduada en función de la incidencia solar y de la época del año. (Fuentes, 2014)

El sistema de fachada desafía la tipología típica de los rascacielos de la zona, aportando una solución más ágil y dinámica a las condiciones climáticas. Las Torres Al Bahar buscan proporcionar un diseño contextual y culturalmente sensible que también utiliza tecnología moderna para lograr los más altos estándares de eficiencia posibles.

El sistema de sombreado "Mashrabiya", basado en una celosía tradicional árabe, es uno de los principales conceptos que ha llevado a Aedas a ganar el encargo para la construcción de las torres que serían la sede de ADIC en Abu Dhabi. Desarrollado por el equipo de diseño por ordenador, el trabajo de los arquitectos e ingenieros consistió en encontrar una descripción paramétrica de la geometría de los paneles móviles de la fachada y simular su función en respuesta a la exposición del sol y el cambio resultante de los ángulos de incidencia en diferentes puntos durante el año. (wikiarquitectura, 2020)



(a)



(b)

Figura 2. (a) Al Bahr Towers, Abu Dhabi. Foto de Aedas. (b) Composición geométrica del sistema de paneles y su estructura, abierta (izquierda) y cerrada (derecha). Foto de designboom, 2012.

3.6.2. One Ocean, Pabellón Para Expo 2012 Yeosu De SOMA.

Arquitecto: SOMA

Fecha: 2012

Ubicación: Yeosu, Corea del Sur

Seleccionado como ganador del primer premio de un concurso internacional convocado en Yeosu, Corea del Sur, para la Expo 2012, el pabellón temático One Ocean ha sido diseñado para transformar en una experiencia arquitectónica el lema de la Expo: “el océano vivo y la costa”.

La fachada cinética, desarrollada en conjunto con Knippers Helbig Ingenieros, tiene una longitud total de 140 metros y una altura variable entre 3 y 13 metros. La superficie, que incorpora aspectos climáticos biomiméticos, está formada por 108 láminas compuestas de polímeros reforzados con fibra de vidrio, que les confiere la resistencia a la tracción y la rigidez de flexión que permite grandes deformaciones elásticas reversibles.

Las láminas, que sirven para controlar las condiciones lumínicas del interior del edificio, se mueven mediante accionadores controlados por ordenador, alimentados, a su vez, por paneles solares ubicados en la cubierta del edificio. Cada lámina puede ser dirigida individualmente. (Experimenta,



(a)



(b)

2012)

Figura 3. (a) One Ocean Thematic Pavilion. Foto de SOMA. (b) Láminas de la fachada One Ocean SOMA, 2012.

3.6.3. Lincoln Mil57.

Arquitecto: Antonio Segundo Imbert y Arquitectos Ninouska Nova

Fecha: 2013

Ubicación: Avenida Abraham Lincoln 1057, Piantini, Santo Domingo Distrito Nacional.

Este inmueble de oficinas combina instalaciones de alta categoría con un diseño contemporáneo y tiene una altura de diez niveles, más una terraza.

El sistema de protección solar metálico de la fachada del Lincoln Mil 57 se basa en una estructura tridimensional de pirámides irregulares, separada de un muro cortina de cristal laminado. Este diseño no solo maximiza la entrada de luz natural, sino que también reduce la radiación solar directa y asegura una alta resistencia a las condiciones climáticas adversas.

A pesar de enfrentar retos técnicos y logísticos significativos, que fueron superados con éxito, el arquitecto Antonio Segundo Imbert lideró el diseño, dando como resultado un edificio que no solo integra la modernidad, sino que también enriquece el entorno urbano.

La fachada de esta edificación fue pensada inicialmente como una envolvente responsiva que reaccionara al recorrido del sol. No obstante, no se llevó a cabo, ya que para el año en que se realizó este proyecto, la tecnología necesaria no estaba tan globalizada como lo está hoy en día, lo que implicaba un costo muy elevado para su implementación.



(a)



(b)

Figura 4. (a) Lincoln Mil 57. Fotografía de Fernando Calzada. (b) Interior de fachada del Lincoln Mil 57 Fotografía de Fernando Calzada.

3.7.1. Concepto de prototipo

Es una simulación del producto final cuyo objetivo principal es probar su funcionalidad y viabilidad. Además, los prototipos proporcionan una gran cantidad de información sobre la interacción de los usuarios, y son de mucha ayuda a la hora de descubrir mejoras e innovaciones que pueden hacer nuestro proyecto aún mejor. Gracias a ellos, podemos tocar el producto, ver cómo funciona, saber si son ergonómicos, y descubrir detalles que normalmente en el ordenador o en el papel no podemos experimentar. (The Inventions Emporium, 2021)

3.7.2. Prototipo de Envolvente Responsiva

Implica la creación de un modelo preliminar de un sistema arquitectónico o de construcción que pueda adaptarse y responder a diferentes condiciones ambientales y de uso. Este tipo de prototipo utiliza tecnologías y materiales innovadores que permiten que la envolvente del edificio pueda adaptarse a cambios en la temperatura, la humedad, la luz y otros factores ambientales. Características:

- **Adaptabilidad:** La envolvente debe ser capaz de adaptarse y responder a diferentes condiciones ambientales y de uso, lo que significa que debe tener la capacidad de cambiar su forma, orientación, transparencia u opacidad, etc.
- **Eficiencia energética:** El prototipo debe ser capaz de minimizar el consumo de energía del edificio mediante la regulación de la entrada de luz solar, la ventilación natural, el control de la temperatura, etc.
- **Comodidad del usuario:** La envolvente debe proporcionar un ambiente interior confortable y saludable para los usuarios del edificio, lo que implica controlar la temperatura, la humedad y la calidad del aire interior.
- **Durabilidad:** Los materiales y tecnologías utilizados en la envolvente deben ser duraderos y resistentes a los elementos ambientales para garantizar la longevidad del prototipo.
- **Innovación:** El prototipo debe incorporar tecnologías y materiales innovadores que no se utilizan en la construcción convencional y que puedan mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los edificios.
- **Viabilidad técnica:** El prototipo debe ser viable en términos técnicos para su posible implementación en la construcción a gran escala.
- **Investigación y desarrollo:** El prototipo puede ser utilizado como una herramienta para la investigación y el desarrollo en el campo de la arquitectura. Implica evaluar su desempeño en diferentes condiciones y entornos y analizar los resultados obtenidos.

3.8. Aplicación como múltiples soluciones arquitectónicas

3.8.1. Soluciones

Un sistema de envolvente responsiva puede ser aplicado como un gran número de soluciones arquitectónicas. Esto ya que, por definición misma, puede ayudar a controlar factores como temperatura, luz, flujo del viento, entre otros. Haciéndola una solución versátil en diversos casos, desde su uso en fachas de todo tipo de edificaciones, como cubierta, como domo, e incluso sobre superficies con necesidad de un cerramiento con una forma irregular, no solo con un objetivo funcional, sino también con un enfoque estético, representando un carácter morfológico único de este tipo de solución arquitectónica. Ya que es posible que el diseño se adapte a distintas áreas de recubrimiento.

3.8.2. Interacción con el Usuario y El entorno

Las envolventes responsivas incorporan elementos móviles para interactuar con el entorno y los usuarios.

La interacción con los usuarios se puede lograr a través de sensores que detectan la presencia o movimiento de personas, provocando una respuesta desde la fachada. Por ejemplo, una fachada puede abrirse para brindar ventilación adicional cuando los sensores detectan una alta concentración de personas en una habitación. Alternativamente, una fachada puede cerrarse para brindar privacidad cuando las personas están muy cerca del edificio.

La interacción con el entorno también se puede lograr a través de sensores que detectan cambios en el clima o las condiciones de luz. Por ejemplo, una fachada puede ajustar su posición o forma para bloquear la luz solar directa durante la parte más calurosa del día, o para permitir que entre más luz solar durante los meses de invierno cuando la luz natural es limitada.

Además de los sensores, las fachadas cinéticas también se pueden controlar mediante sistemas manuales o automatizados. Los controles manuales se pueden usar para ajustar la posición o el movimiento de los elementos de la fachada, mientras que los sistemas automatizados se pueden programar para responder a entradas específicas del entorno o del usuario.

3.8.3. Oportunidades de investigación y desarrollo

Al fomentar el área de investigación en República Dominicana. Se hace posible desarrollo de tecnologías relacionadas con la envolvente responsiva permitiendo la creación de edificios más eficientes en términos energéticos. Las tecnologías responsivas pueden ayudar a reducir el consumo de energía de los edificios, disminuyendo así su impacto ambiental.

3.8.4. Direcciones futuras y desafíos

En un inicio el desarrollo de Envolvente Responsiva puede presentar un gran costo, debido a la falta de mercado que proporcione insumos necesarios para su desarrollo, además de ser una tecnología que para el país es algo poco integrado en la arquitectura.

Por esto mientras más se desarrollen este tipo de soluciones arquitectónicas, el mercado en consecuencia se adecuará las mismas, y por consiguiente permitiendo la concepción integral de proyectos de este estilo en el país, reduciendo considerablemente su costo.

3.9. Contexto

3.9.1. Justificación de ubicación

Una envolvente responsiva, en arquitectura, es un sistema arquitectónico que puede adaptarse a las condiciones climáticas y ambientales de su ubicación geográfica, mejorando la eficiencia energética de un edificio y proporcionando un ambiente interior más cómodo para sus ocupantes.

Es posible que una envolvente responsiva pueda estar en cualquier ubicación geográfica, ya que el diseño y la tecnología detrás de estas envolventes están destinados a adaptarse a las condiciones climáticas locales. Esto significa que, independientemente de la ubicación geográfica, una envolvente responsiva puede ser diseñada para aprovechar las condiciones ambientales naturales, como la luz solar, la dirección del viento, las temperaturas y la humedad relativa, para mejorar la eficiencia energética del edificio y proporcionar un ambiente interior confortable.

La República Dominicana posee un clima que varía dependiendo de la ubicación geográfica. Por lo que se plantea el Campus UNPHU, edificio 1, lugar elegido para llevar a cabo el proceso de prototipo y evaluar con mediciones el prototipo en un ambiente controlado. Ya que sería un ambiente controlado, donde se facilitaría el desarrollo del prototipo de envolvente.

sin embargo, no es posible evaluar y medir la eficacia de la envolvente en todos los lugares del país al mismo tiempo, por esto se toma la decisión de elegir una zona concreta para realización de pruebas físicas, no obstante, esto no implica que simulaciones futuras no estén pensadas con un alcance mayor.



Figura 5. (a) Ubicación y localización de la Universidad Pedro Henríquez Ureña, UNPHU. (b) Foto satelital del campus UNPHU. (c) Unidad de arquitectura avanzada, UA+.

3.9.2. Clima de Santo Domingo

El clima de Santo Domingo refleja las características típicas de un clima marítimo tropical influenciado por su ubicación cerca del Mar Caribe. La temperatura generalmente se mantiene cálida y constante durante todo el año, con una mínima promedio de 25 °C y máximas que rara vez superan los 30 °C. La ciudad tiene una importante temporada de lluvias de mayo a octubre, con lluvias frecuentes y a veces intensas que benefician la vegetación tropical circundante. Los meses de verano son calurosos y húmedos con una alta humedad relativa. En cambio, los inviernos son más frescos y secos, con temperaturas más moderadas y menos precipitaciones.

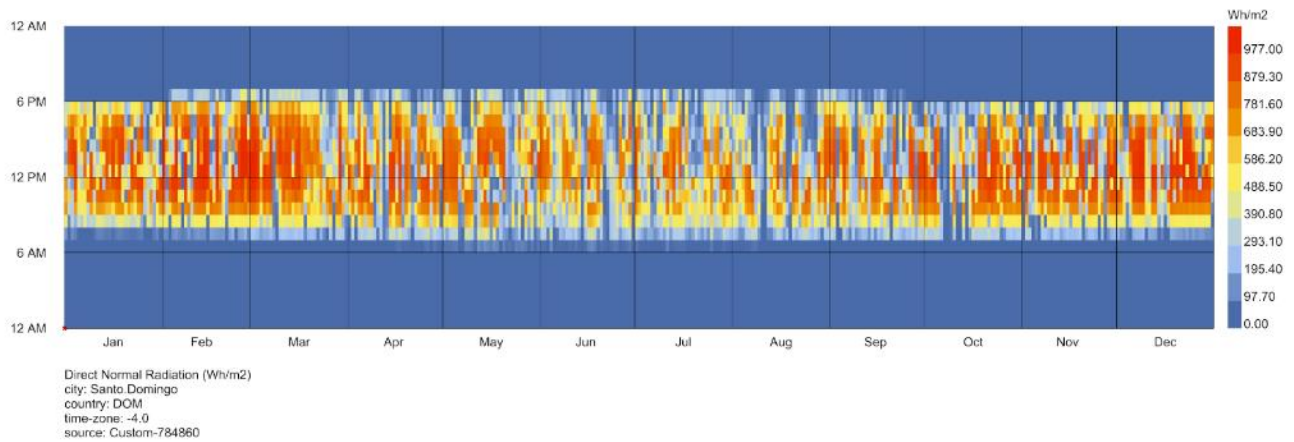


Figura 6. Irradiación: Energía por unidad de área (Wh/m2). Es muy útil para saber que cantidad de energía puede recibir una edificación del sol. En arquitectura puede ser aplicado al diseño de envolvente y eficiencia energética.

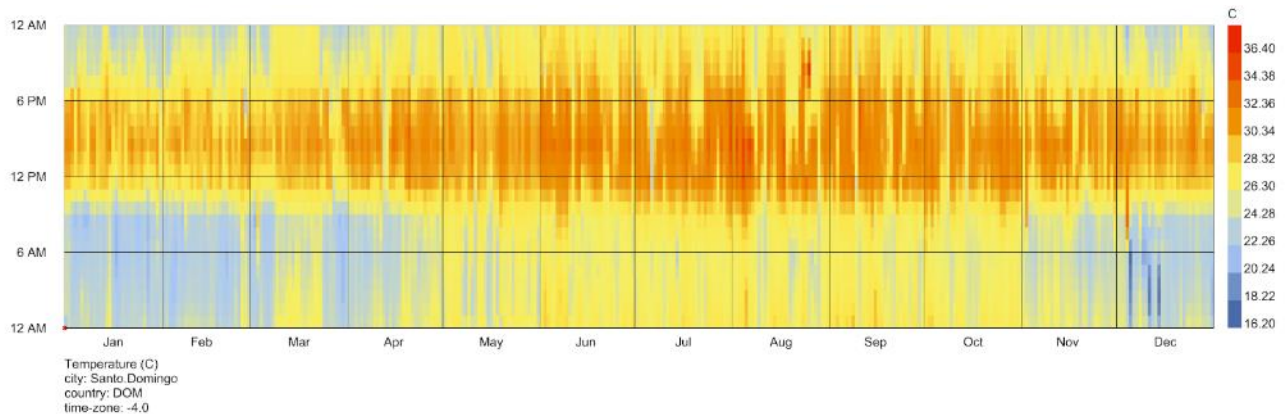


Figura 7. Temperatura: El gráfico muestra la relación de temperatura por hora y sus variaciones en el transcurrir del año. Así sabemos que parámetros debemos contemplar al momento de diseñar.

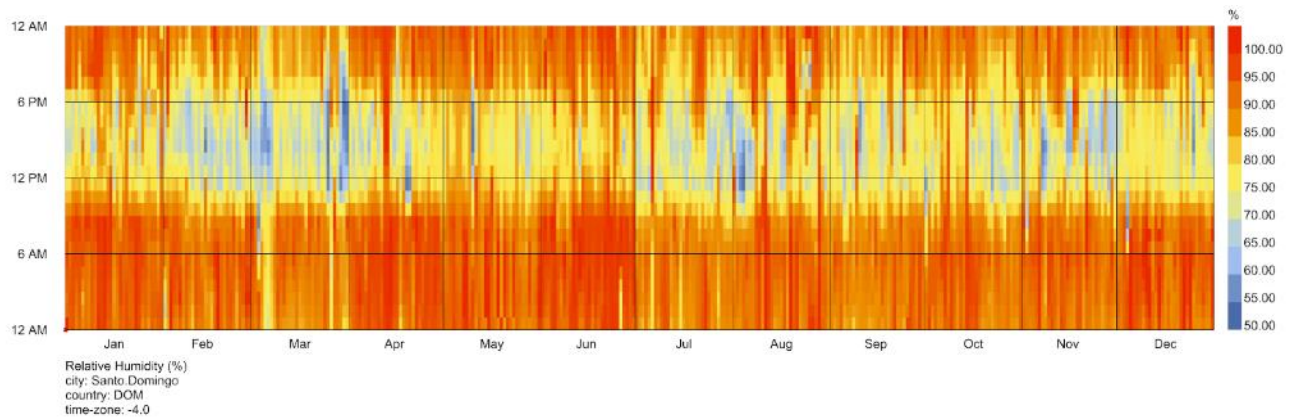
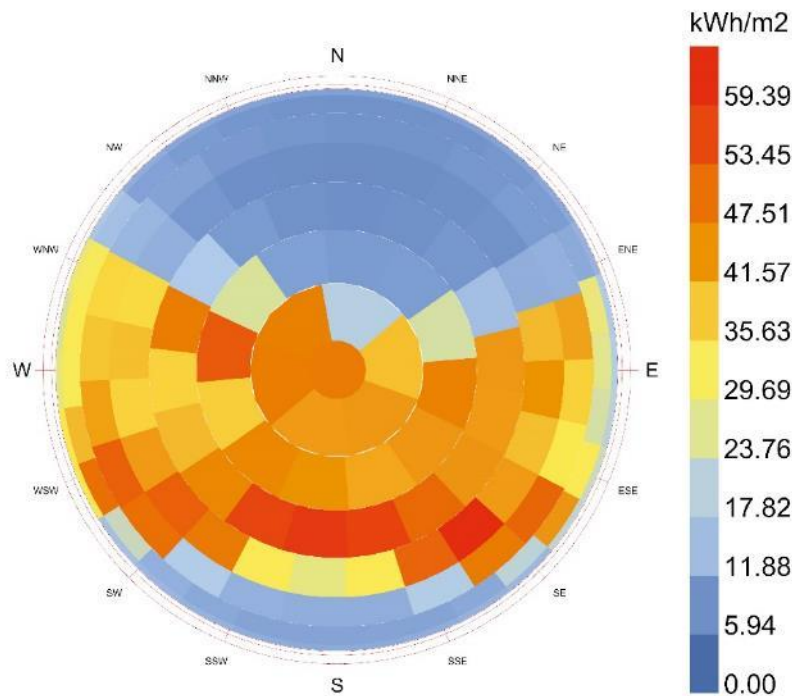


Figura 8. Humedad Relativa: Representa cuanta humedad hay en el aire en relación al máximo que este puede contener. Es importante controlar el porcentaje de humedad, ya que este influye directamente en el confort.



Total Radiation
 01 Jan 00:00 - 31 Dec 23:00
 city : Santo.Domingo
 country : DOM
 time-zone : -4.0

Figura 9. Radiación Total: El gráfico expresa que parte de una edificación en relación a su ubicación recibe mayor irradiación. En este caso Santo Domingo, durante todo el año.

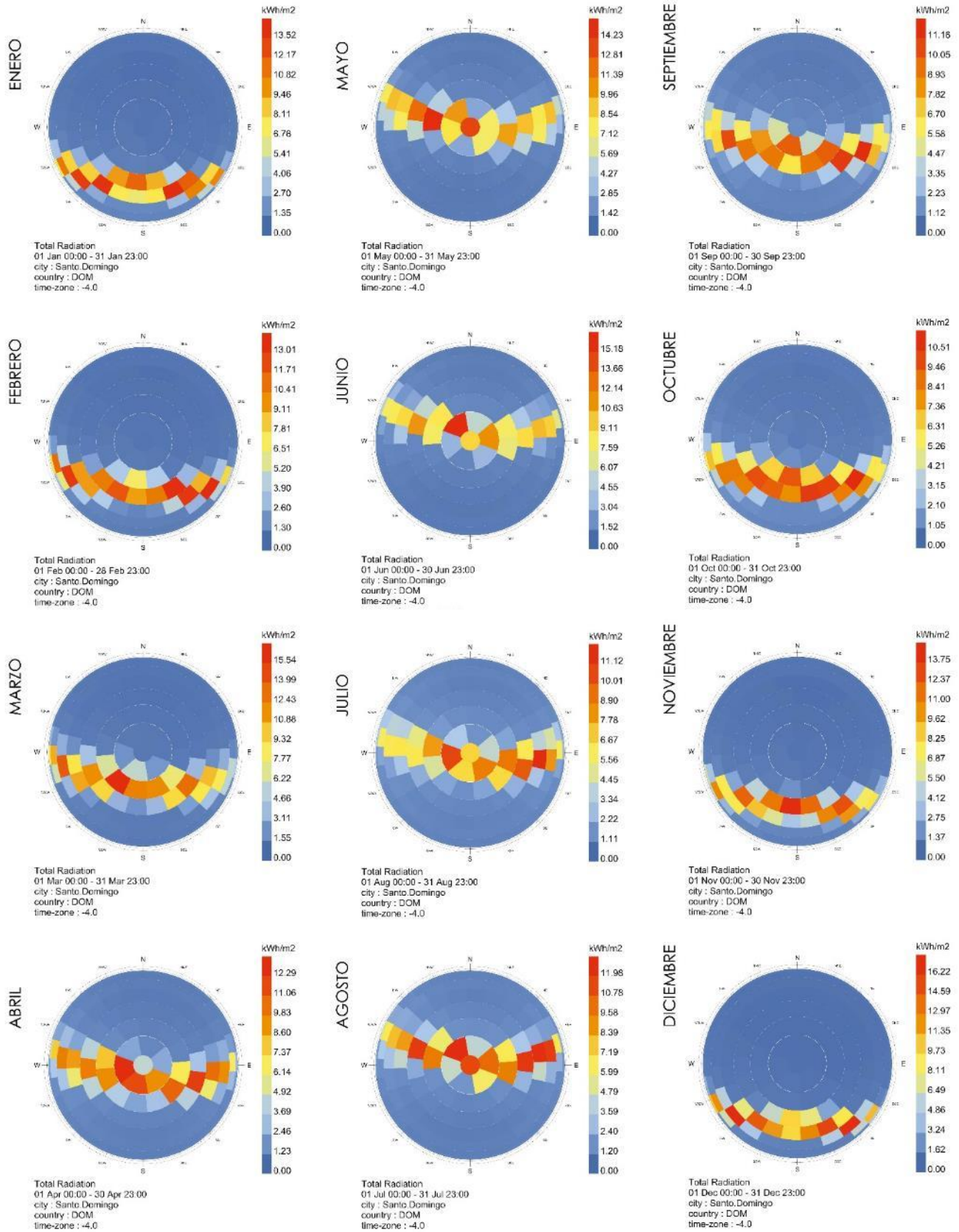


Figura 10. Radiación Total: Los gráficos expresan que parte de una edificación en relación a su ubicación recibe mayor irradiación. En este caso Santo Domingo, desglosado cada mes.

3.10. Conceptualización

3.10.1. Desarrollo de la idea

Se parte de la idea de crear una envolvente adaptable a casi cualquier edificación de ser posible. Por lo que su composición debe permitirle ser permeable a diversas superficies.

Para esto se decide diseñar un módulo que sea replicable y personalizable. Para que a través de la repetición de estos se conforme la envolvente. Siendo la principal característica de este módulo la capacidad de cambiar para adaptarse a las necesidades.

El valor del prototipo no se encuentra en la individualidad de cada módulo, sino en el conjunto. El conjunto y la coordinación de los módulos es lo que aporta el valor a la envolvente. En base a este razonamiento, se busca generar un módulo cuya acción sea lo más simple posible, permitiendo así el control total de los mismos y facilitando aspectos como su programación y personalización.

Tomando como acción del módulo la rotación sobre un eje central, similar a las celosías popularmente utilizadas, obtenemos paneles que pueden ser agrupables de forma variable y totalmente personalizables en forma, dimensión y materialidad, además de reducir las posibles partes mecánicas de necesitaría para su funcionamiento.

Las características formales de este panel pueden varias tanto como sea necesario, siempre y cuando cumpla con los siguientes aspectos:

- Debe permitir la rotación en base a un eje central
- Debe ser replicable en patrones regulares.

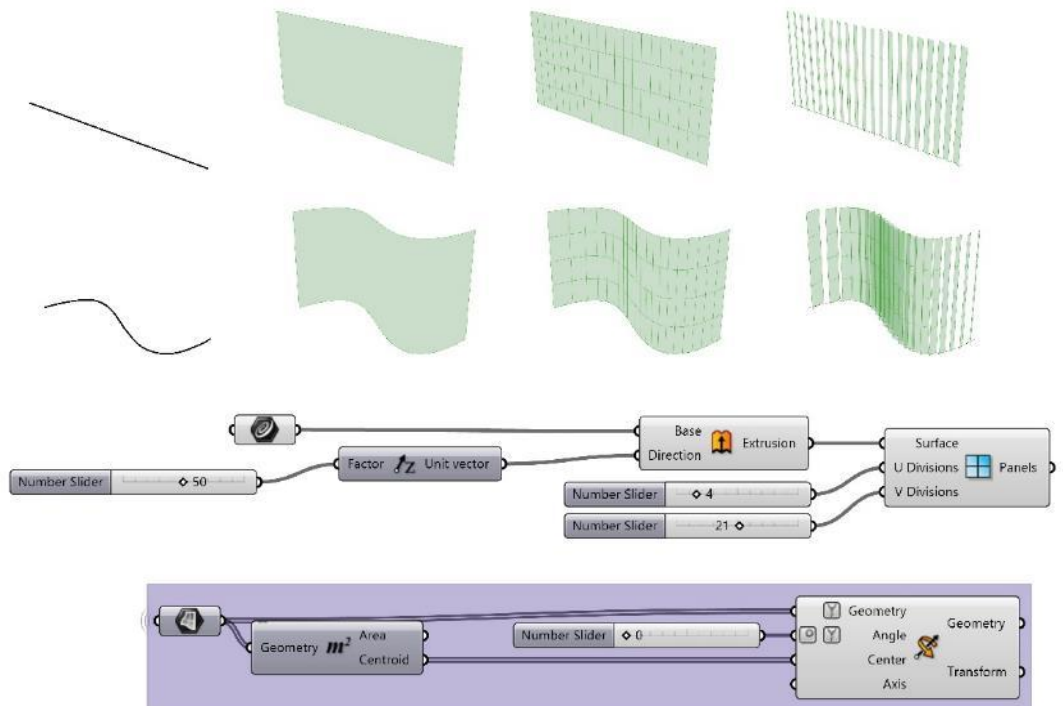


Figura 11. Generación de paneles móviles y su script en Grasshopper, software de programación visual.

3.10.2. Recorrido del sol

Para el caso práctico de estudio. Se implementará el seguimiento del recorrido del sol para determinar la posición de los paneles de la envoltura.

Hay 2 maneras posibles de ejecutar esta acción:

1. Con sensores que a tiempo real detecten la dirección de la luz solar y con ello direccionar el movimiento de la envoltura.
2. Como ya se ha estudiado y se conoce el comportamiento del sol y su posicionamiento a través del año, es factible simular el mismo y así, digitalmente determinar la posición de los paneles según la fecha y hora a tiempo real.

Son conocidos métodos de análisis del recorrido del sol, como la carta solar, siendo este mundialmente aceptado como efectivo. Con base en este y el banco de información de LadyBug, obtenemos una simulación confiable del recorrido solar.

El siguiente paso es coordinar este recorrido con la posición de los paneles. Cada panel de la envoltura es tratado como un ente individual. Se traza un vector entre el panel y la posición estimada del sol y se define la rotación en base al ángulo obtenido.

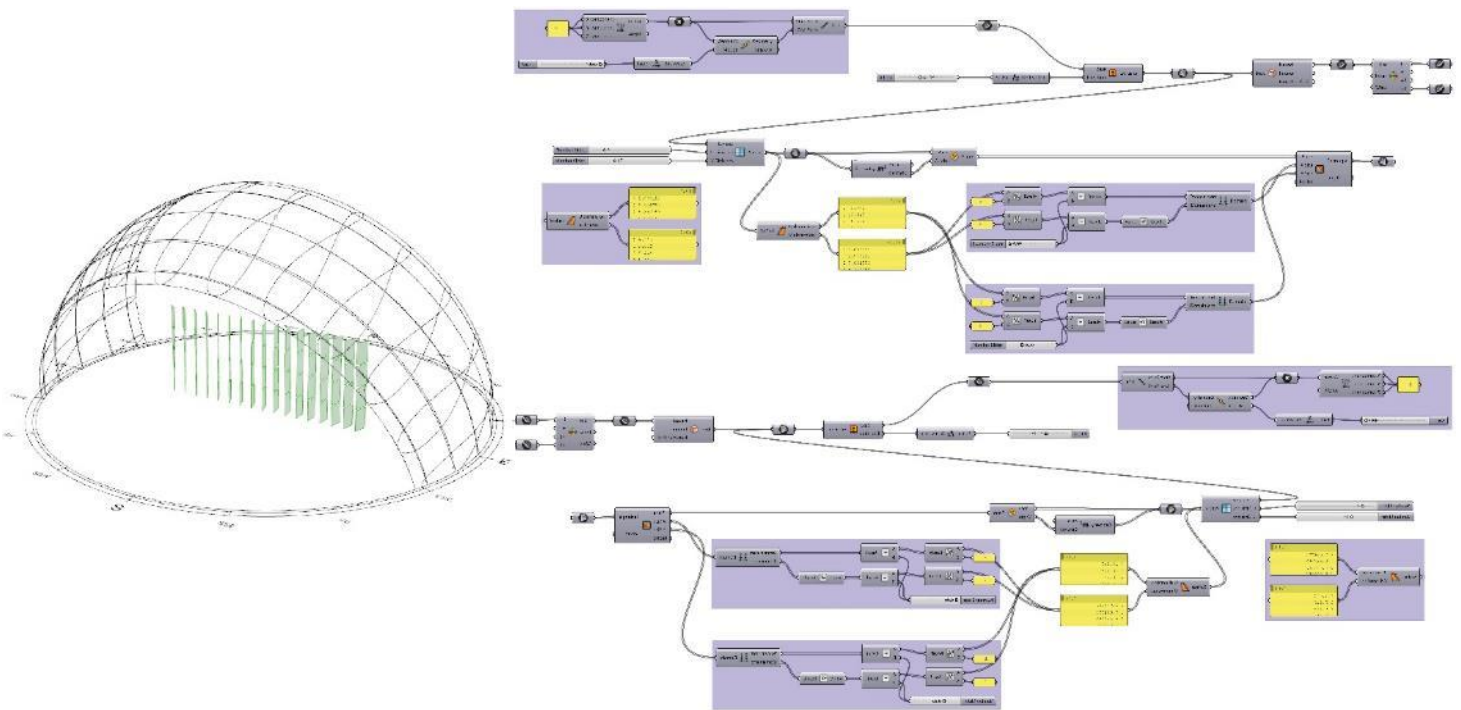


Figura 12. Programación del seguimiento de los paneles al recorrido solar u otros elementos.

3.11. Propuesta de envolvente

El prototipo de envolvente ofrece soluciones climáticas y estéticas, pudiendo transformar la edificación en un foco de atención e interés.

Se analizan factores como humedad, temperatura, viento, entre otros. Para esto, se propone la captura constante de datos con el objetivo de crear una base de datos que permita comparar en tiempo real las condiciones climáticas de la edificación. Esto ayudará a definir el posicionamiento idóneo de los paneles en función de las necesidades actuales.

La información se jerarquiza según el objetivo. Por ejemplo, si la temperatura es elevada, es necesario bloquear la acción del sol, pero si hay viento, se debe permitir su entrada. Así, los paneles deben adaptarse a ambos escenarios. También se priorizan otros estímulos que contribuyan al confort.

En situaciones donde se tenga la libertad de modificar la fachada independientemente del clima, se priorizan las soluciones estéticas, buscando atraer y mantener la atención del usuario.

Siguiendo la lógica de los estímulos explicada previamente, también se puede incorporar el movimiento del usuario como un factor. Esto permitiría controlar las acciones de la envolvente en función de su movimiento, utilizando sensores de proximidad.

Además del movimiento dependiente de estímulos externos, la fachada también puede ser programada para realizar movimientos personalizados, creando patrones, animaciones y escenarios únicos.

El diseño de la envolvente se basa en un módulo replicable que reacciona a movimientos en función de estímulos digitales. Cada módulo estará compuesto por tres partes principales:

- **Mecánica:** Consta de un servomotor conectado a un microcontrolador, el cual es manejado por el equipo principal. Los cuales se soportan sobre una estructura metálica sencilla. Las dimensiones del motor dependerán del peso y dimensiones del panel. Esto porque estas características definen la fuerza que este va a necesitar.
- **Estructural:** Incluye rodamientos axiales, los cuales soportan el peso de los paneles y permiten el giro. Estos son definidos por el peso y la posición donde serán colocados. La estructura como principio, plantea el soporte cada módulo de manera individual, y esta se ancla al edificio. Se pueden tomar consideraciones para optimizar, las cuales deben ser sugeridas por un especialista.
- **Panel:** Los paneles son definidos por 3 aspectos: Forma, Dimensión y Materialidad. Las dimensiones son definidas en relación a la superficie a cubrir y el espacio disponible para la colocación de los mismos. Esta influye directamente en la estructura y peso de los módulos. La forma responde a intereses de diseño, y es variable siempre y cuando permita la rotación en base a un eje central y sea replicable en patrones regulares.
- **El material es definido por intereses bioclimáticos, estéticos, económicos y funcionales.** Esto porque estos definen casi en su totalidad el resultado final de la envolvente. La siguiente tabla incluye materiales sugeridos:

Tabla 1. Sugerencia de materiales para los paneles de la envolvente.

Nombre del material	Descripción	Ventajas	Desventajas	Peso aproximado por m ²
PVC (Policloruro de vinilo)	Plástico sintético versátil usado en sistemas de construcción.	- Económico - Fácil de limpiar - Resistente a la humedad	- Menos resistente a condiciones extremas - Puede decolorarse con el tiempo	1300 y 1450 kg/m ³
Madera tratada	Madera natural sometida a procesos para exteriores.	- Apariencia estética y natural	- Requiere mantenimiento regular	500 - 1400 kg/m ³ (dependiendo del tipo de madera)

		- Buen aislamiento térmico	- Susceptible a insectos y humedad	
Paneles de aluminio compuestos (ACP)	Material con núcleo termoplástico ignífugo entre láminas de aluminio.	- Ligero - Resistente - Buena estética - Bajo mantenimiento	- Más caro que el PVC - Menos ecológico que materiales puros	1,150 - 1,400 kg/m ³ (Depende del grosor de las capas)
Fibra de vidrio reforzada	Material compuesto de fibras de vidrio y resinas.	- Alta durabilidad - Resistente al agua y rayos UV - Bajo mantenimiento	- Puede ser más caro - Fabricación especializada	1,500 - 2,000 kg/m ³
Polycarbonato	Termoplástico resistente usado en cubiertas y elementos translúcidos.	- Alta resistencia al impacto - Ligero - Buena protección solar (tratamiento UV)	- Puede amarillear con el tiempo - Menor aislamiento térmico	1,200 kg/m ³
Acero inoxidable	Aleación de hierro y cromo resistente a la corrosión.	- Alta resistencia a la corrosión - Larga vida útil - Alta durabilidad	- Costo elevado - Más pesado	7,900 kg/m ³

Fuente: *Elaboración propia.*

3.12. Prototipado

3.12.1. Recopilación de datos

Se plantea la construcción de un espacio controlado que simule la envolvente a menor escala, para entender su funcionamiento y principalmente recopilar datos climáticos In Situ. De modo que se pueda utilizar esta información para optimizar el diseño de la envolvente.

Está pensado para que en un futuro antes del diseño final de una envolvente, se puedan colocar elementos similares en el terreno, para levantar data climática y utilizarla para generar arquitectura que realmente responda al entorno inmediato.

Para se utilizó Arduino equipado con sensores de Temperatura, Humedad y en algunos casos Intensidad de la luz. Los cuales están dentro de las cajas recolectando información climática en tiempo real.

Todas las piezas de la caja fueron diseñadas y fabricadas a través de Fabricación Digital.

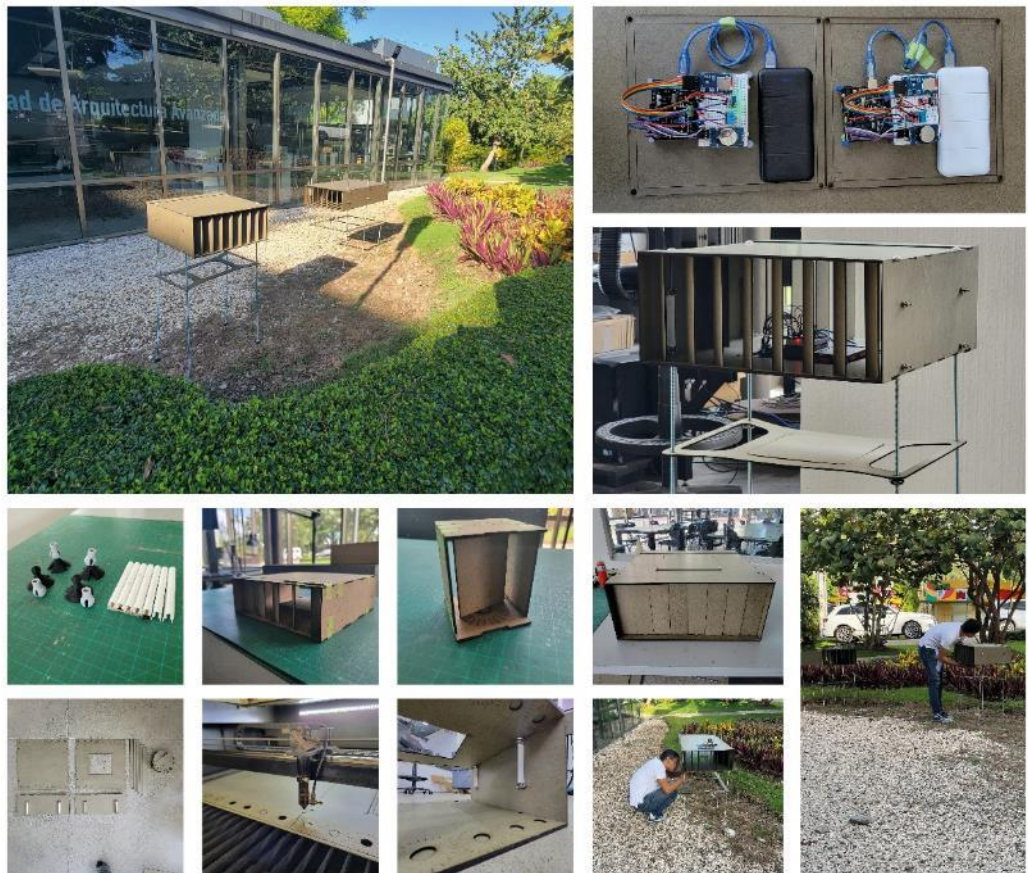


Figura 13. Cajas de recolección de data climática. Modelos tamaño (0.5 x 0.5m y 0.5 x 1m) que simulan el área a evaluar.

El diseño se pensó para asemejarse al prototipo de envoltente planteado. Se generó un script con principios similares y se produjo un modelo paramétrico. Permitiendo modificarla en volumen y distribución de paneles. Todas las piezas utilizadas fueron diseñadas y fabricadas en el Lab UA+.

A exceptuar de componentes digitales como Arduino y partes metálicas, como tuercas y tornillos.

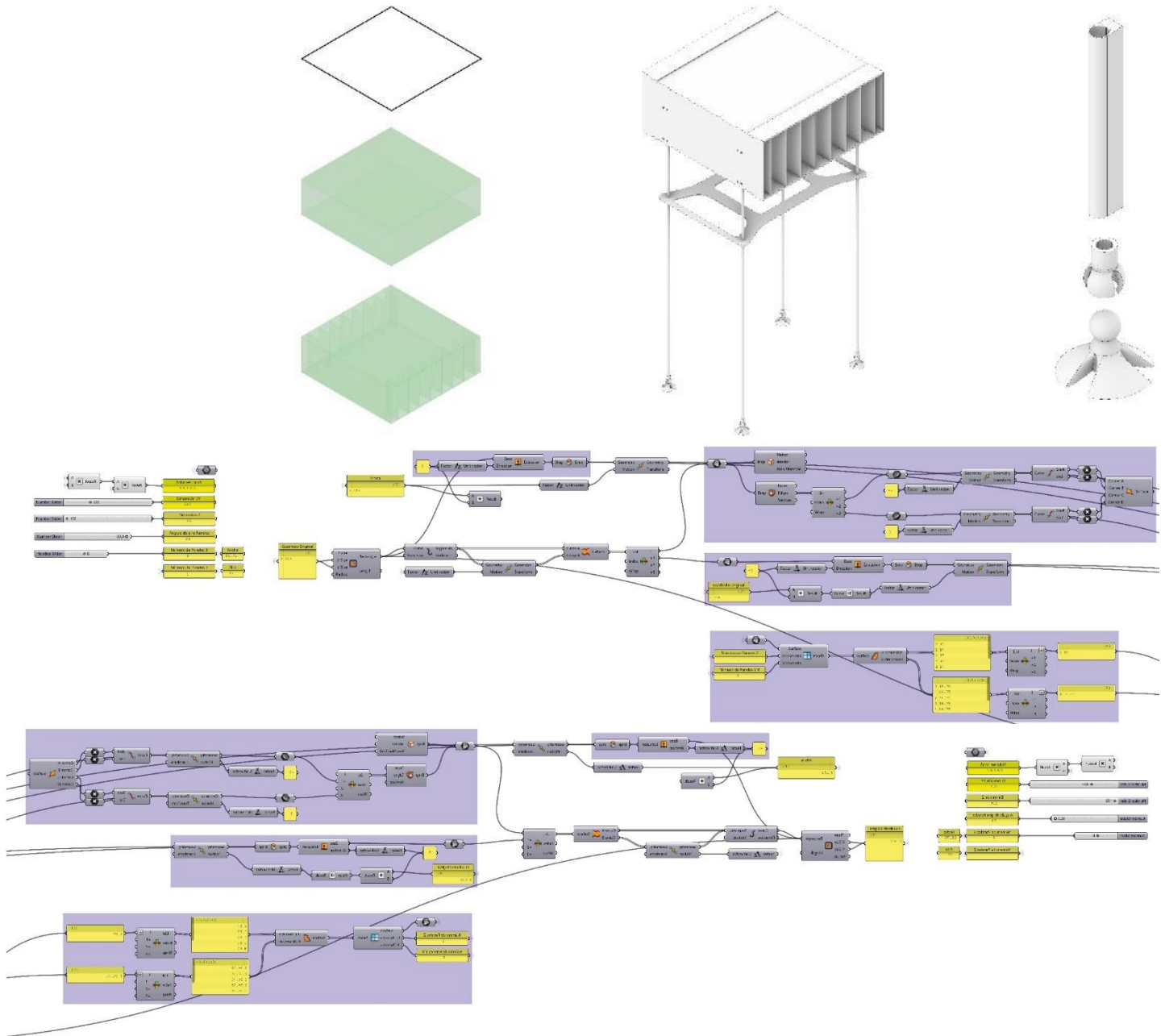


Figura 14. Proceso de modelado de cajas de recolección de data climática.

3.12.2. Arduino

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso.

Se colocaron sensores utilizando Arduino, que miden la temperatura, la humedad y la intensidad de la luz. Para lograrlo, se empleó un sensor DHT11 para obtener las lecturas de temperatura y humedad, y un sensor LDR (resistor dependiente de la luz) para medir la intensidad lumínica. Además, se agregó un módulo de reloj para ubicar las mediciones en el tiempo y un lector de memoria micro sd para registrar los datos. El Arduino se encarga de recopilar los datos de estos sensores y procesarlos, permitiendo así monitorear en tiempo real las condiciones ambientales. Los datos serán posteriormente analizados y graficados para obtener una mejor comprensión de las variaciones en las condiciones ambientales.

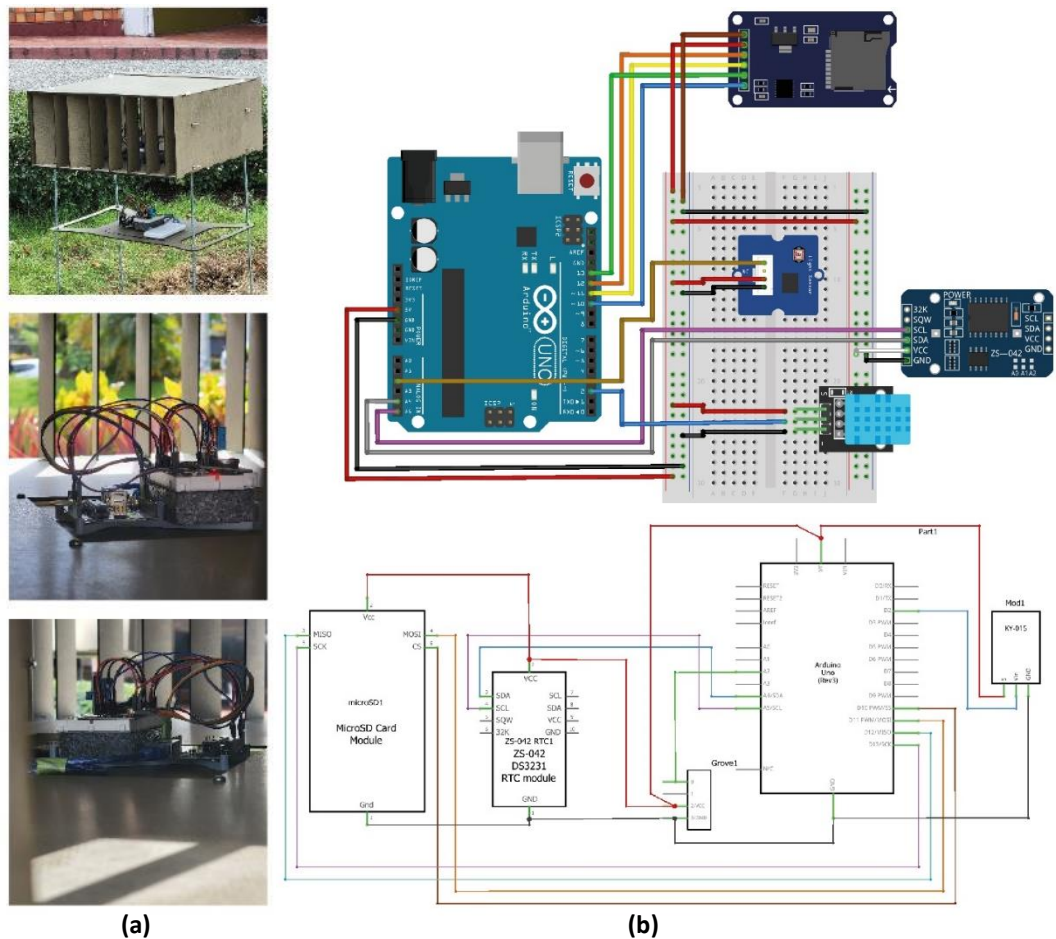


Figura 15. (a) Arduino dentro de los modelos de recolección de data. (b) Diagrama de funcionamiento del Arduino.

3.13. Análisis del Laboratorio UA+

3.13.1. Eficiencia Energética

Al simular la radiación incidente, se analiza la eficiencia energética (KWh/m²), o la cantidad de energía necesaria para mantener la vivienda en condiciones de confort durante un año. Las simulaciones fueron realizadas con LadyBug en Grasshopper.

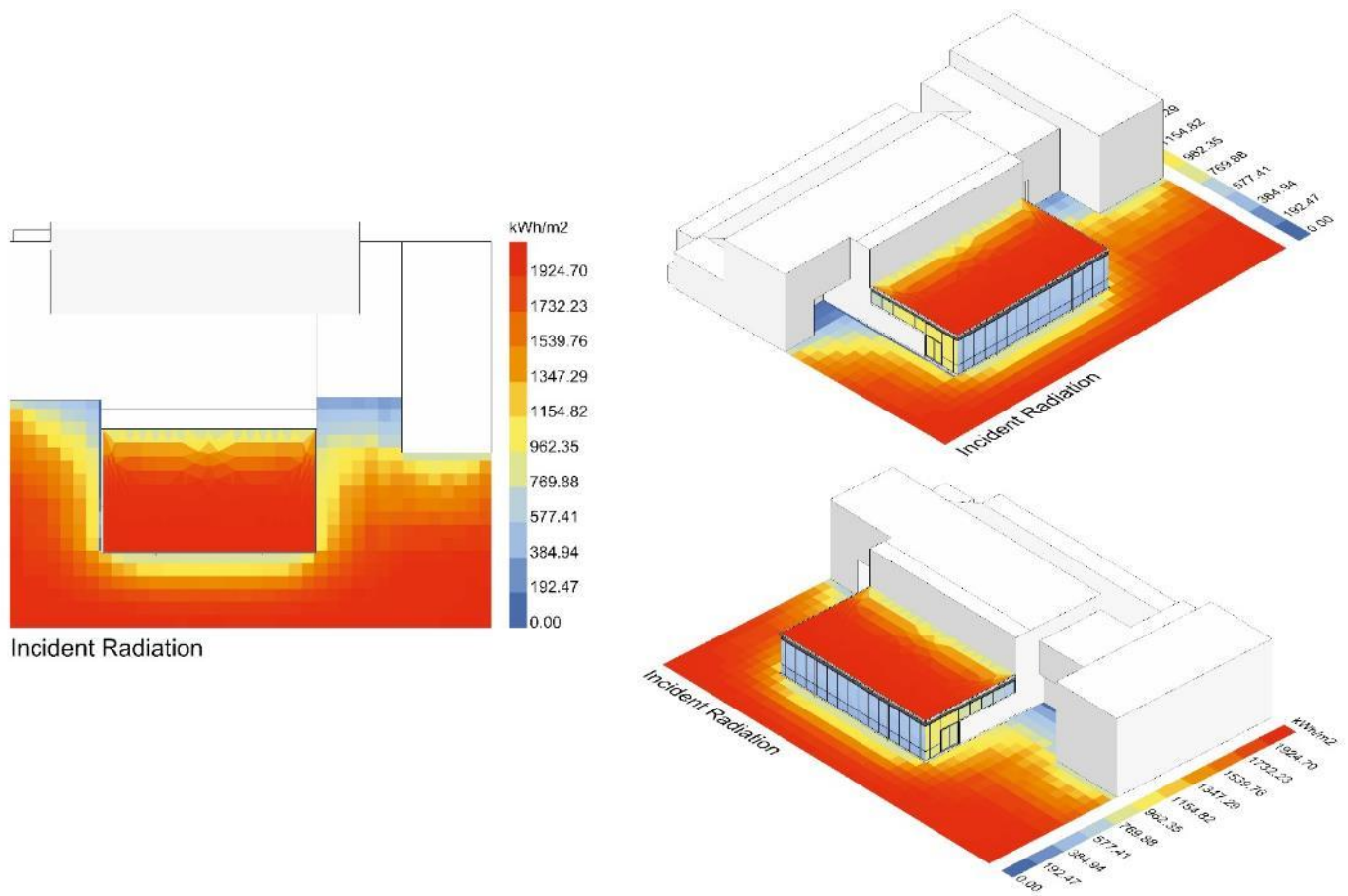


Figura 16. Simulación de la radiación incidente (KWh/m²) promedio durante todo el año, del Lab UA

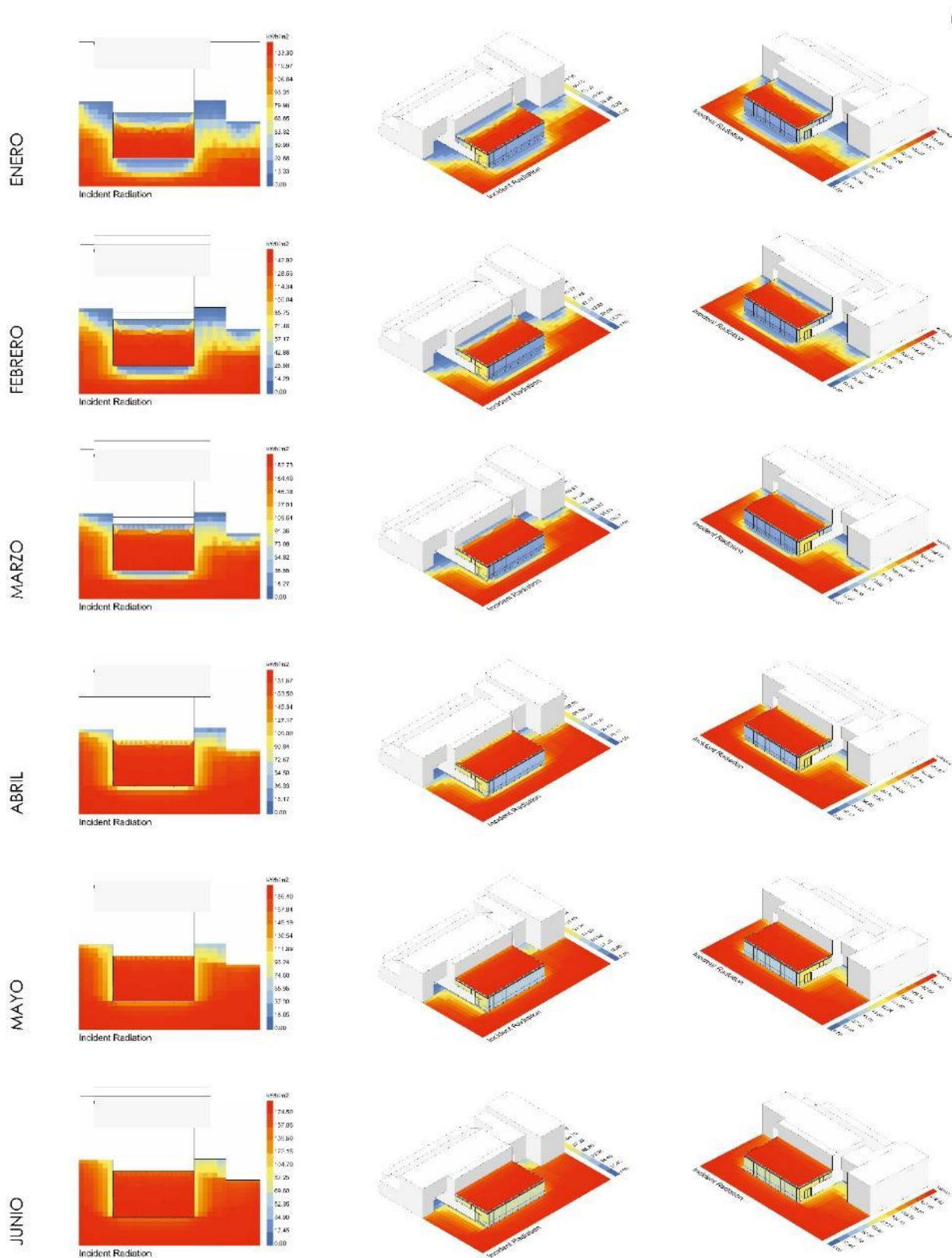


Figura 17. Simulación de la radiación incidente (KWh/m²) promedio por mes, del Lab UA

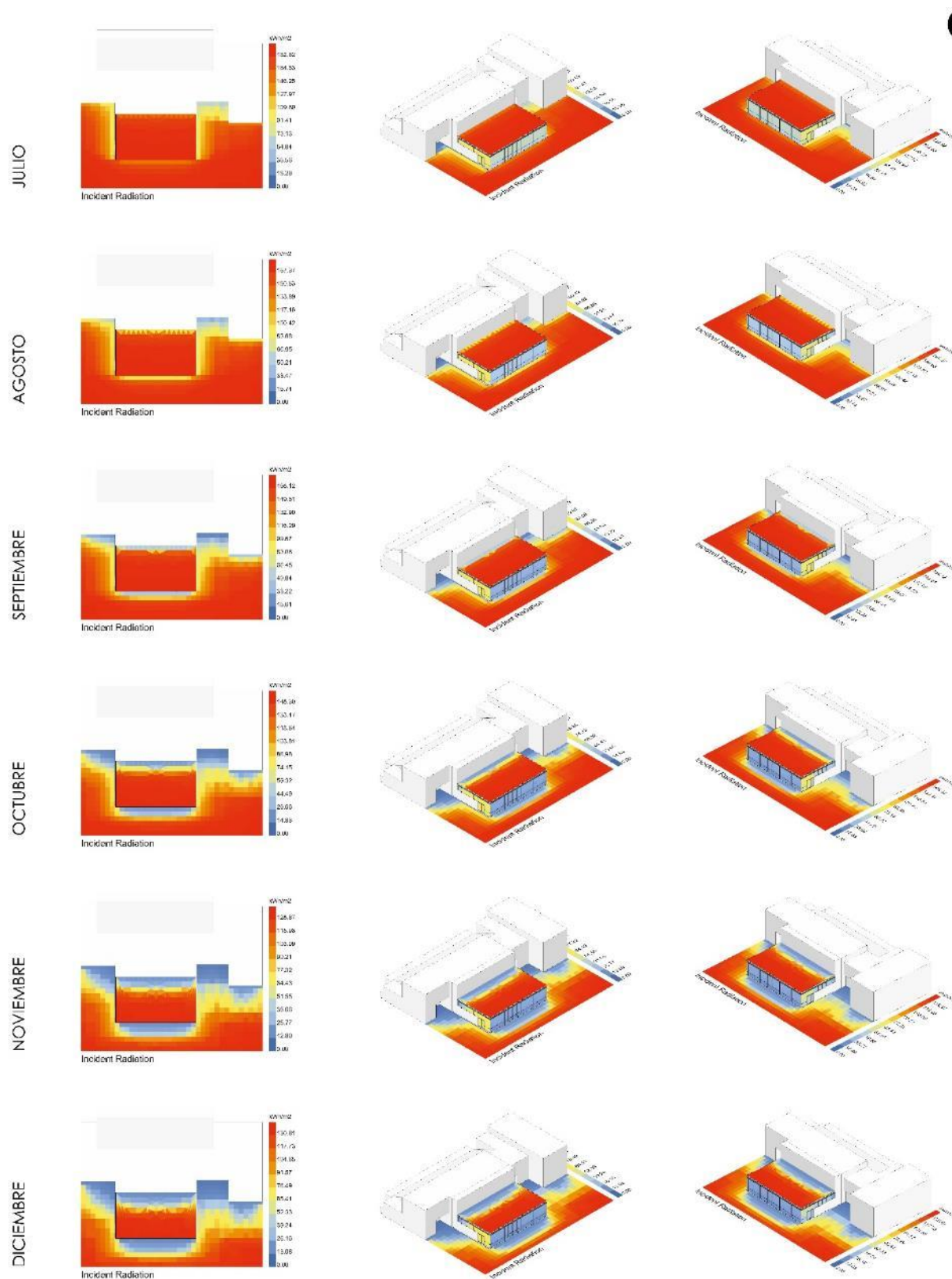


Figura 18. Simulación de la radiación incidente (KWh/m²) promedio por mes, del Lab UA

3.13.1. Análisis de horas directas de sol

Se aplica la información que nos suministra la carta solar para determinar cuántas horas de sol recibe la edificación en cada una de sus fachadas. Para esto se simuló individualmente cada mes y se obtuvo un promedio de horas de sol recibidas. Esto considerando la presencia del Taller Norte, el cual colinda con el Lab UA+.

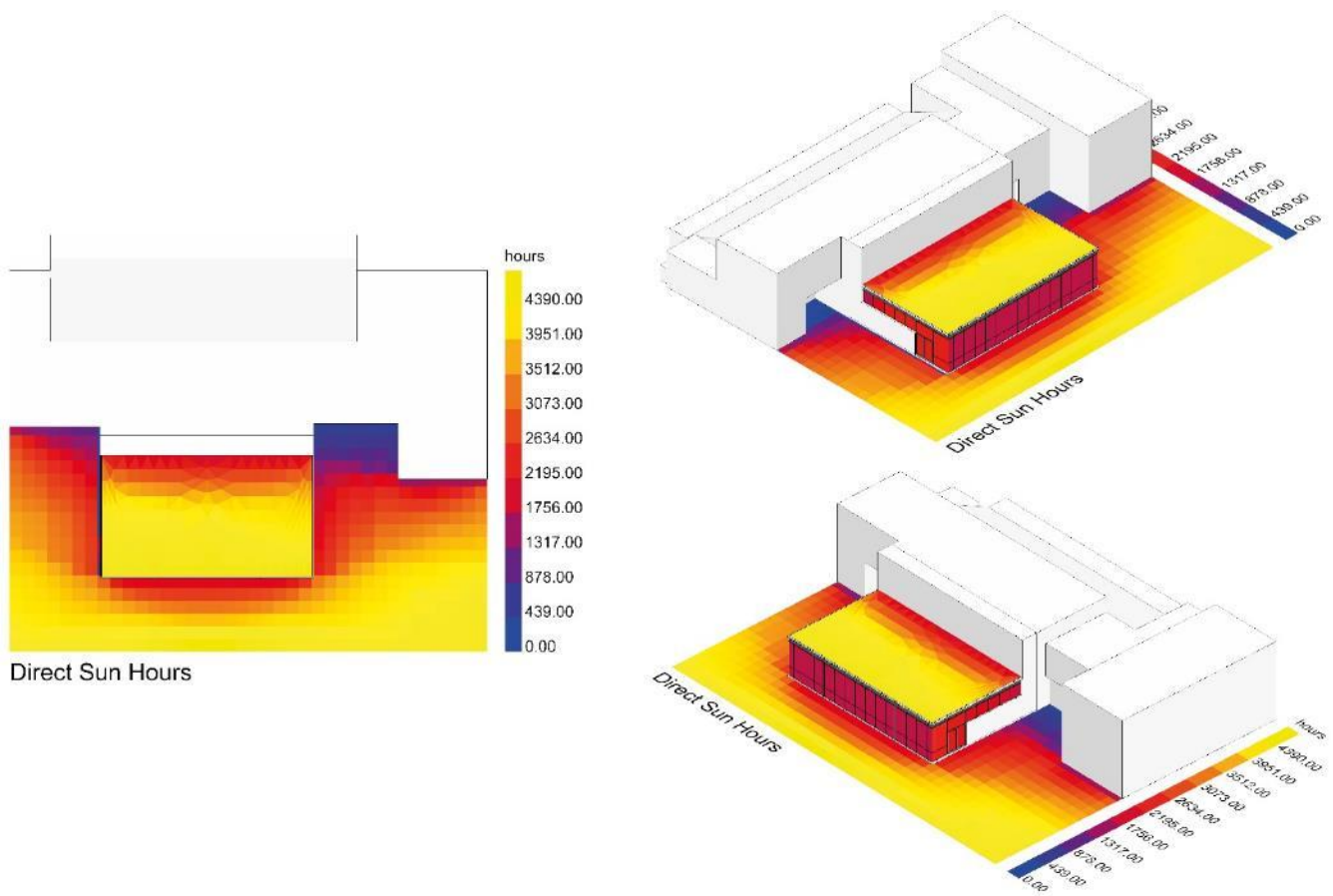


Figura 19. Simulación de directas de sol promedio anual, del Lab UA

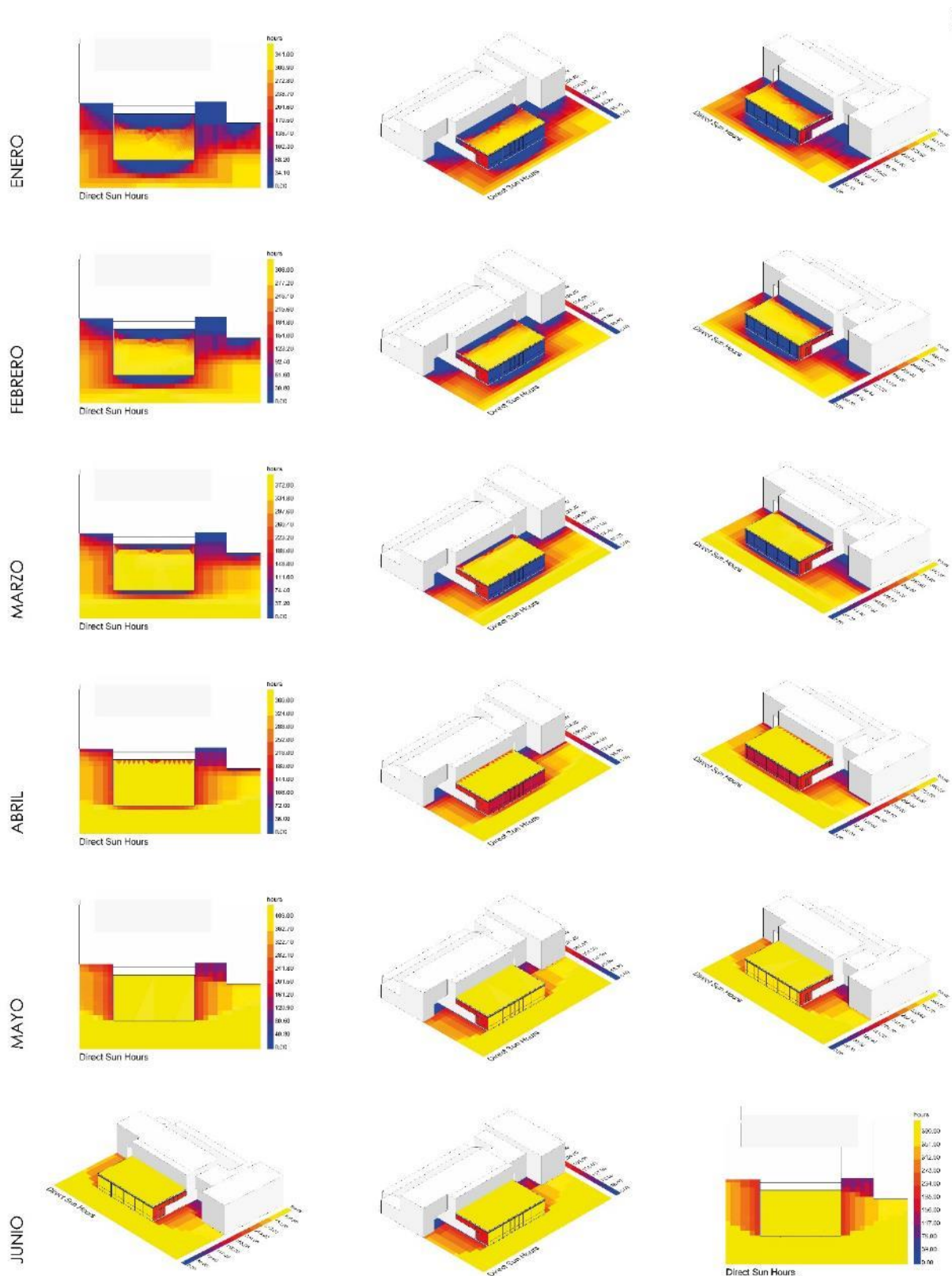


Figura 20. Simulación de directas de sol promedio por mes, del Lab UA

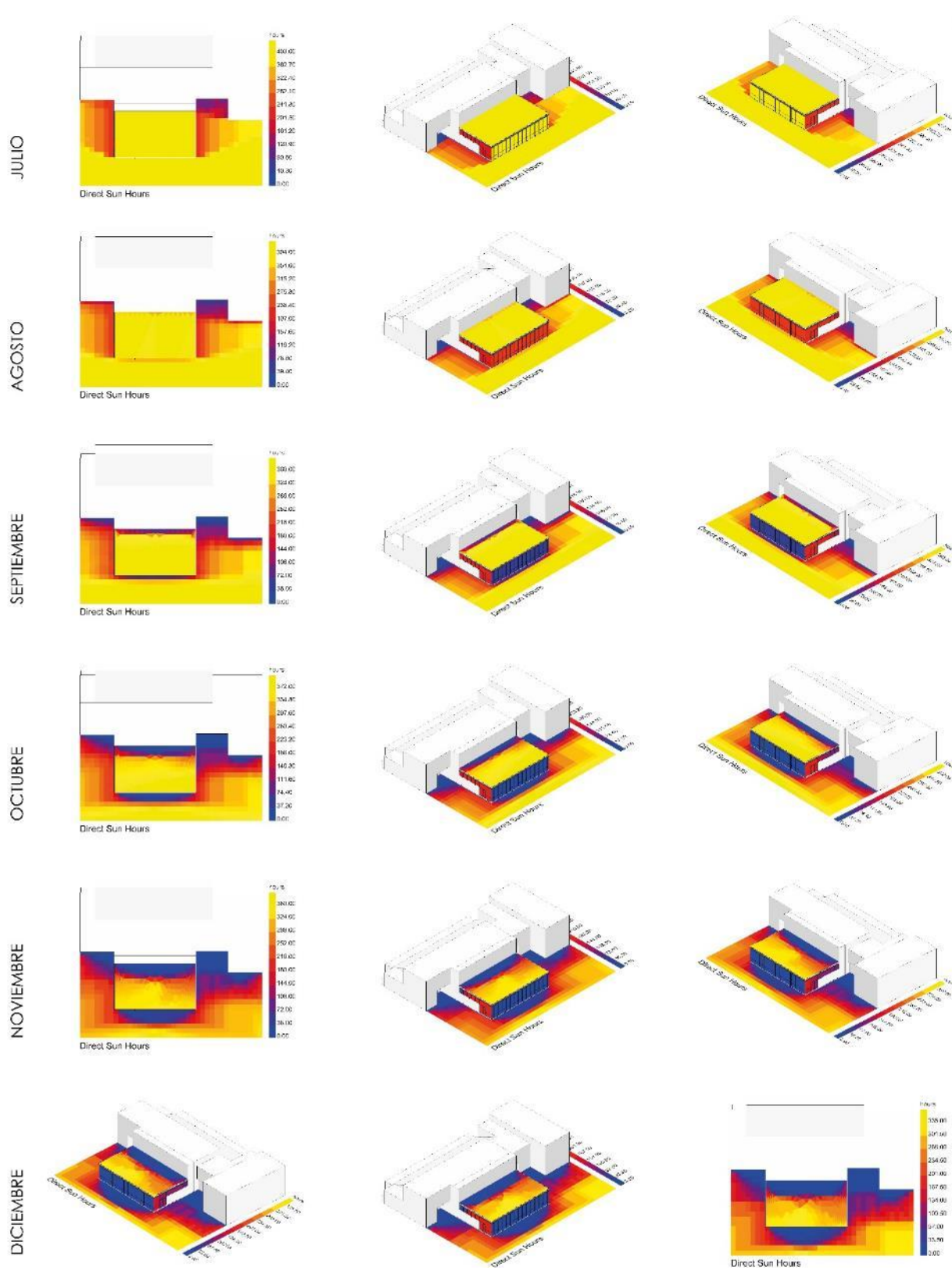


Figura 21. Simulación de directas de sol promedio por mes, del Lab UA

4. Conclusiones

4.1. Condición Climática

El objetivo de todo análisis climático en arquitectura es entender cómo afectan estas condiciones para así tomar decisiones de diseño.

Graficando los resultados del estudio, vemos 4 panoramas posibles a los que se puede enfrentar una edificación.

Estos definidos por los siguientes aspectos:

Se tomó en cuenta la humedad promedio, temperatura, horas de sol, irradiación, velocidad y temperatura del viento. Para determinar el nivel de confort en una edificación.

Los gráficos superiores (a) muestran el índice de clima térmico universal (UTCI) es un parámetro de biometeorología humana que se utiliza para evaluar los vínculos entre el medio ambiente exterior y el bienestar humano. Los índices de confort térmico describen cómo el cuerpo humano experimenta las condiciones atmosféricas, específicamente la temperatura del aire, la humedad, el viento y la radiación. (Índices de Comandos Térmicos — Índice Climático Termal Universal, 1979-2020, s. f.)

Los gráficos centrales (b) clasifican este índice según el estrés térmico de la edificación. Finalmente, los gráficos inferiores (c), señalan el confort térmico de una edificación sin refrigeración artificial durante todo el año.

1. Si un edificio recibe sol y no circula aire, por conciencia se calentará (SI Sol y NO viento).

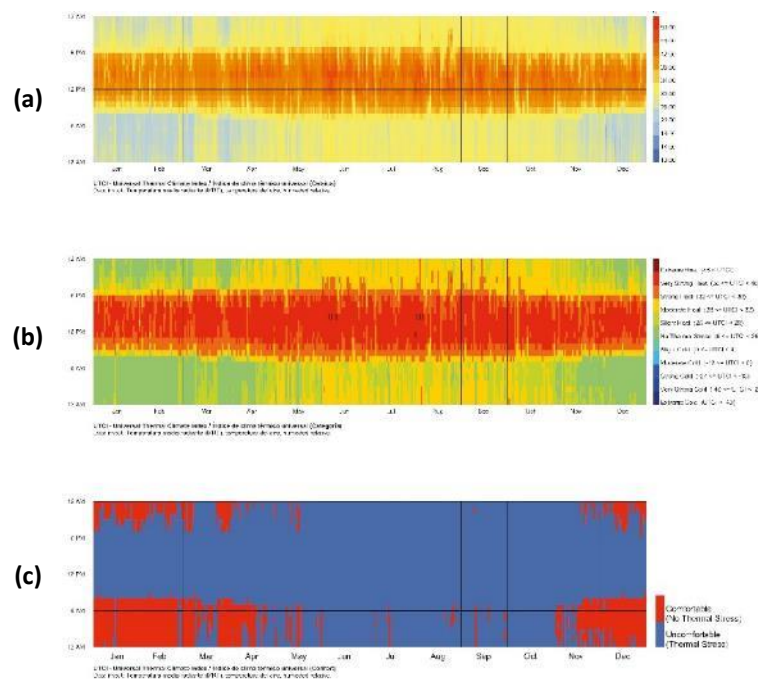


Figura 22. (a) Índice de clima térmico universal (UTCI). (b) Estrés térmico de la edificación. (c) Confort Térmico.

2. Si recibe sol, pero circula el viento, se sigue calentando, pero el impacto es menor (SI Sol y Si Viento).

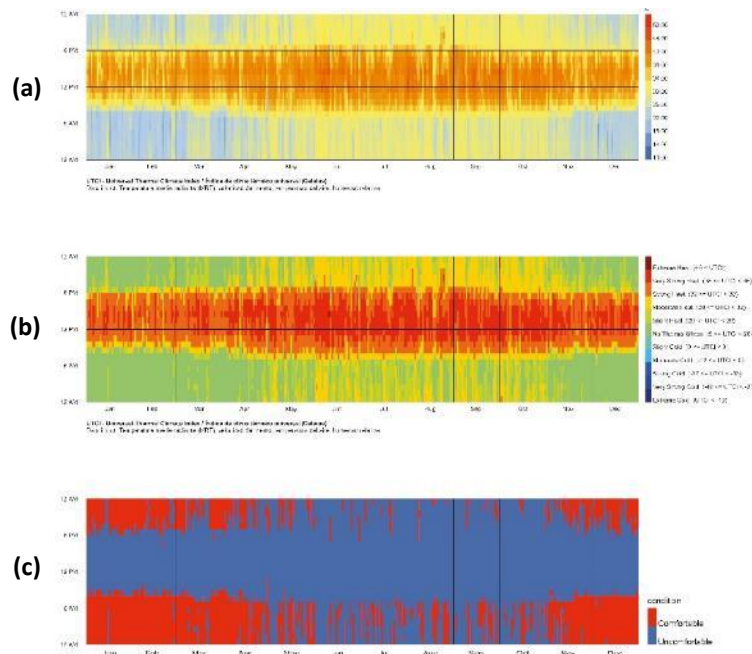


Figura 23. (a) Índice de clima térmico universal (UTCI). (b) Estrés térmico de la edificación. (c) Confort Térmico.

3. Si no recibe sol ni circula el viento, seguirá en estrés térmico, ya que no puede refrigerarse (No sol, No viento).

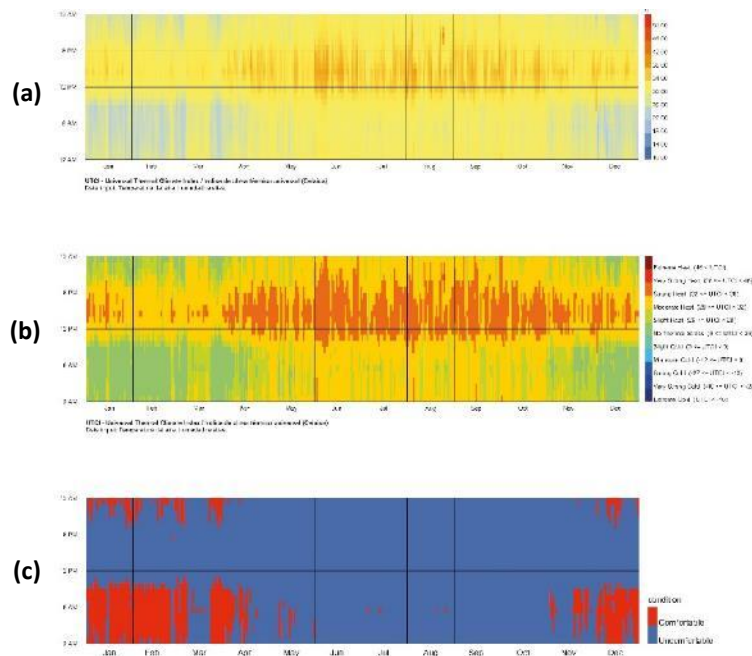


Figura 24. (a) Índice de clima térmico universal (UTCI). (b) Estrés térmico de la edificación. (c) Confort Térmico.

El objetivo del planteamiento en el 2do nivel de la fachada norte es demostrar como el prototipo se puede adaptar a otros espacios en edificaciones varias. Mediante cambios leves en dimensiones, estructura y motores.

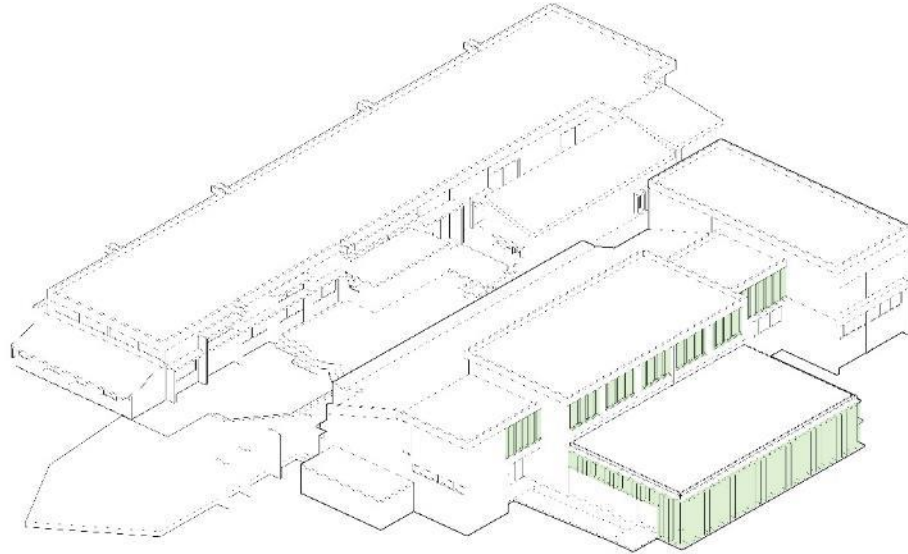


Figura 26. Ubicación de la envolvente propuesta en la edificación.

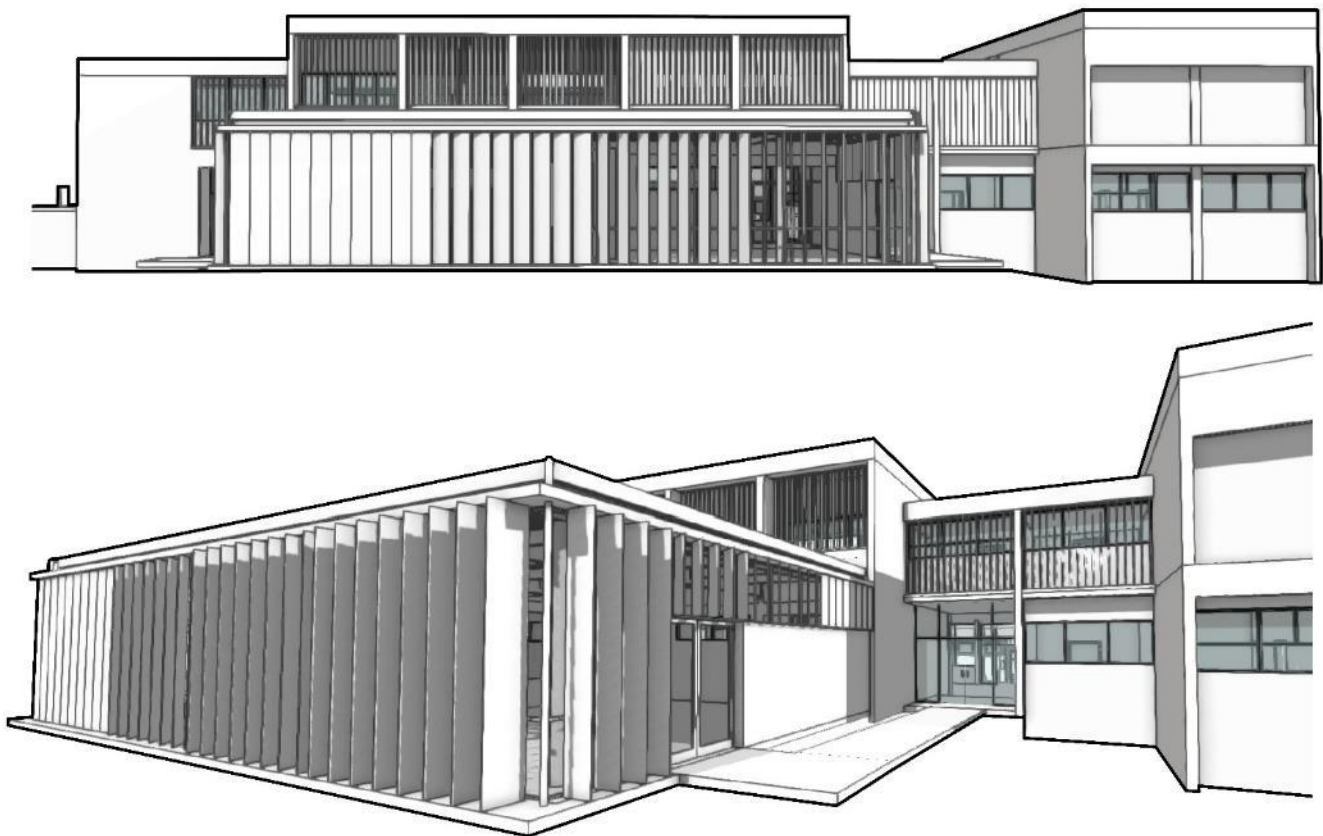


Figura 27. Vistas de la envolvente propuesta en la edificación.

4.3. Comparativa De Asoleamiento Promedio Diario.

4.3.1. Sin Prototipo De Envolverte

Los gráficos siguientes comparan la incidencia solar promedio diaria en el Lab UA+ en su estado actual y en el escenario con el prototipo de envolverte aplicado.

El Gráfico (a) muestra las horas de sol que recibe, en promedio, el interior de la edificación diariamente, sin el prototipo de envolverte. Simulando las condiciones del mes de agosto, se recopilaron datos cada hora entre las 07:00 y las 19:00, horas aproximadas en que incide el sol.

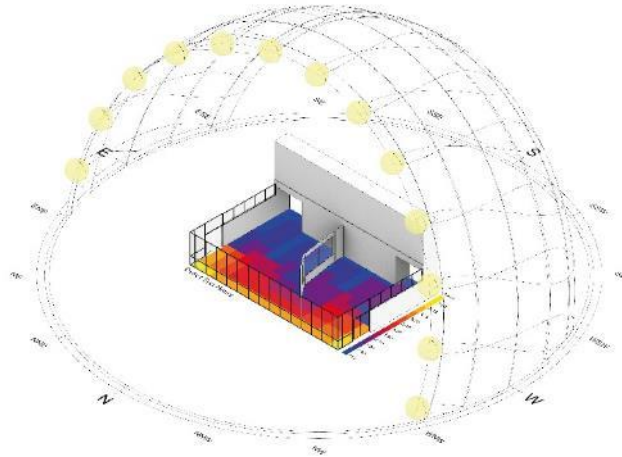


Figura 28. Gráfico (a). Simulación de horas de sol diarias, sin prototipo de envolverte.

4.3.2. Con Prototipo De Envolverte

El planteamiento del prototipo de envolverte busca facilitar el control de la incidencia solar directa recibida sobre cualquier superficie en la que se aplica.

El Gráfico (b) muestra las horas de sol que recibe, en promedio, el interior de la edificación diariamente, con envolverte. Evidenciando la reducción de las mismas casi en su totalidad, exceptuando aquella recibida a través de las puertas traslucidas.

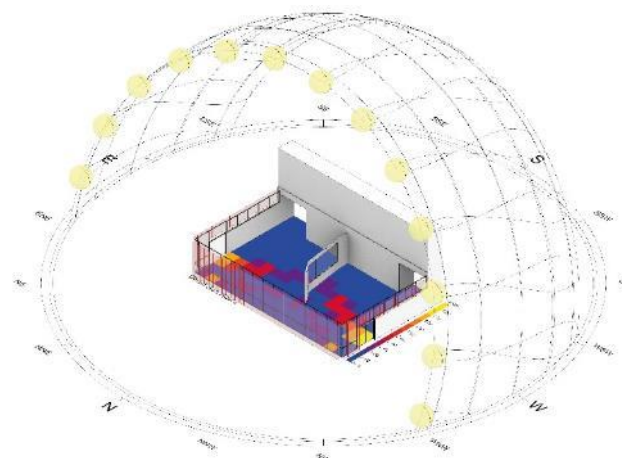


Figura 29. Gráfico (b). Simulación de horas de sol diarias, con prototipo de envolverte.

4.3.3. Comparativa De Incidencia Directa Del Sol.

Los gráficos siguientes comparan la incidencia directa del sol en diferentes momentos del día desde las fachadas este y oeste, que son las más afectadas. Mostrando una reducción de la radiación directa en todos los casos donde se aplicó el prototipo de envoltente responsiva.

Para esto se simula la posición del sol con relación a la edificación y en base a esto se proyecta la luz directa incidente.

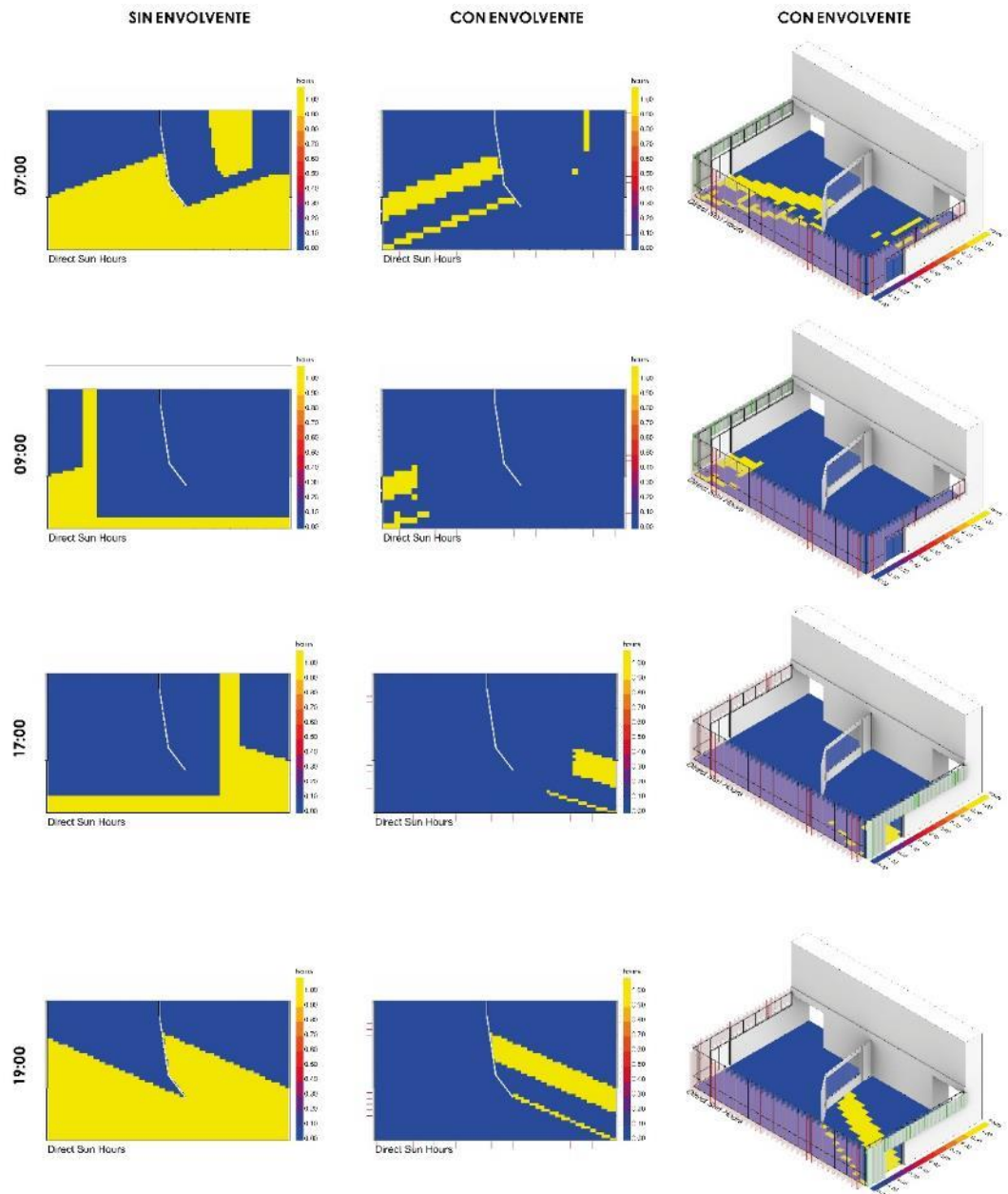


Figura 30. Incidencia directa del sol en horas de la mañana y el atardecer.

4.4. Variables En La Aplicación Del Prototipo De Envolvente.

Desde la concepción de la idea del prototipo se pensó para que este sea aplicable y replicable en distintas superficies y posibles edificaciones. Para su colocación en la Facultad de Arquitectura y Artes fueron planteadas 3 variables para adaptarse así de manera puntual a los espacios necesarios.

Siguiendo los principios planteados en la propuesta de envolvente “Cada módulo estará formado por 3 partes principales: Mecánica, Panel y Estructural.”, es posible adaptar un módulo de envolvente, solo ajustando parámetros en estos 3 grupos. En la parte mecánica, los motores responderán a la cantidad de trabajo que deben realizar, esto determinado por el peso y posición de los paneles. Los paneles serán ajustados en su dimensión, para corresponder a preferencias de diseño y a la superficie donde serán colocados. Finalmente, la parte estructural, varía en dependencia de las posibilidades de anclaje a la edificación. Cada módulo constará de 2 paneles, esto para facilitar montaje y posibilidades de mantenimiento a futuro, permitiendo el desmonte de cada parte individualmente. (Detalles en el juego de planos de la Tesis, ver referencias)

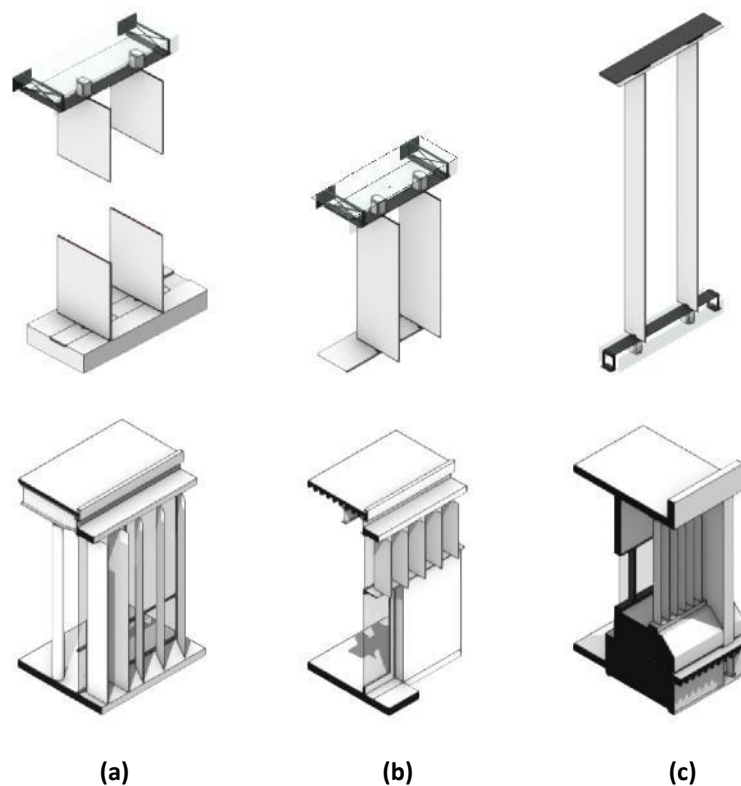


Figura 31. (a) Variante 1: Corresponde a la aplicación del prototipo en la fachada norte del Lab UA+. (b) Variante 2: Se coloca sobre los ventanales Este / Oeste del Lab UA+. (c) Variante 3: Planteada para la fachada norte del segundo nivel del edificio.

4.5. Ventajas Y Desventajas De La Aplicación Del Prototipo.

4.5.1. Ventajas

- Los paneles pueden programarse para responder automáticamente a factores climáticos. Además de regular la luz natural, ayudando a la disminución del consumo energético.
- Los paneles podrían incluir celdas solares para producir energía renovable, aprovechando al máximo las horas de sol con ajustes en su posición.
- Es personalizable en material, dimensiones y forma, pudiendo adaptarse a necesidades puntuales, en conjunto a la capacidad de que el movimiento pueda realizar animaciones personalizadas, puede otorgar una apariencia única y llamativa a la edificación.
- El diseño modular facilita su implementación en diferentes tamaños y escalas de edificios, adaptándose a diversas geometrías. Todas las partes pueden ser reemplazadas de manera individual.

4.5.2. Desventajas

- Complejidad técnica y de mantenimiento. Los motores, sensores y componentes eléctricos requieren revisiones periódicas, además, las conexiones a un sistema de control implican una alta complejidad técnica. Lo que puede repercutir en costos a largo plazo.
- En comparación a fachadas tradicionales, puede representar un coste general mayor.
- La programación de algoritmos para optimizar la respuesta de los paneles y su conexión con sensores climáticos requiere inversión en investigación y desarrollo.
- Aunque la envolvente pueda ahorrar energía en otros aspectos, el movimiento frecuente de los motores implica un consumo energético adicional que debe balancearse.

4.6. Comparativa Entre Aplicación De La Envolvente En Edificaciones Existentes Y Edificios Planificados Para Tenerla.

Plantear la implementación de una envolvente involucra planificación y afrontar una serie de desafíos de diseño. Estos pueden variar entre una edificación que ya está construida y otra que esté en proceso de diseño. Por esto se presenta una comparativa con las implicaciones de la implementación de la envolvente.

	Edificio Existente	Edificio Planificado
Diseño estructural	La estructura original puede no estar diseñada para soportar el peso y las cargas de la envolvente, requiriendo refuerzos que pueden alterar la fachada o el interior.	La estructura se optimiza desde el inicio para soportar el peso, las cargas dinámicas y posibles actualizaciones futuras.
Integración de sistemas	La integración de motores, cableado y sistemas de control puede ser invasiva, comprometiendo la estética interior y exterior.	Los sistemas se integran discretamente, garantizando compatibilidad y un diseño limpio desde el inicio.
Estética y diseño	La envolvente debe respetar el carácter del diseño existente, limitando opciones creativas. Puede parecer un elemento añadido si no se gestiona adecuadamente.	La envolvente puede ser el eje conceptual del diseño, logrando una integración visual y funcional total.
Costo y tiempo	Requiere más tiempo y costos adicionales debido a estudios de factibilidad, refuerzos estructurales y modificaciones en obra.	Se optimizan costos y tiempos al planificar desde el diseño inicial, reduciendo imprevistos y ajustes posteriores.
Funcionalidad energética	Mejora limitada debido a la configuración original del edificio (orientación, ventanas, aislantes). Puede necesitar sistemas adicionales para maximizar la eficiencia.	La envolvente puede trabajar en conjunto con el diseño pasivo (orientación, aislamiento) y activo (motores, sensores) para optimizar el rendimiento energético.
Normativa y permisos	Es necesario verificar compatibilidad con normativas locales para modificaciones exteriores. Puede haber restricciones adicionales en edificios históricos.	El diseño se alinea desde el inicio con regulaciones locales, asegurando un proceso de aprobación más fluido.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, L.C.; metodología, L.C., J.P.; software, L.C.; análisis formal, L.C.; investigación, L.C.; redacción — preparación del borrador original, LC.; redacción — revisión y edición, L.C., J.P., J.C.; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflictos de intereses: El autor declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- ALLPLAN. (2023). ALLPLAN. Obtenido de Visual Scripting: la alternativa a la programación: <https://blog.allplan.com/es/visual-scripting-la-alternativa-a-la-programacion>
- Arqhys Decoración. (2011). Arqhys.com. Obtenido de Arqhys.com: <https://www.arqhys.com/decoracion/el-edificio-inteligente.html>
- certalia. (24 de Enero de 2018). pintufachadas.com. Obtenido de pintufachadas.com: <https://pintufachadas.com/2018/01/24/para-que-sirve-el-mantenimiento-de-fachadas/>
- Designing Buildings. (25 de Noviembre de 2021). designingbuildings. Obtenido de designingbuildings.co.uk: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Kinetic_facade#:~:text=A%20kinetic%20fa%C3%A7ade%20is%20one,occur%20on%20a%20building's%20surface.
- Electronic Board. (21 de Diciembre de 2021). Electronic Board. Obtenido de ¿Qué es una fuente de alimentación? ¿Cómo funciona?: <https://www.electronicboard.es/que-es-una-fuente-de-alimentacion-2/>
- Estudio Gómez Platero. (2024). Arquitectura y nuevas tecnologías: una historia de evolución. Obtenido de Gómez Platero Arquitectura & Urbanismo: <https://www.gomezplatero.com/es/noticias/arquitectura-y-nuevas-tecnologias-una-historia-de-evolucion/>
- Experimenta. (19 de Marzo de 2012). Experimenta. Obtenido de One Ocean, pabellón para Expo 2012 Yeosu de SOMA: <https://www.experimenta.es/noticias/arquitectura/soma-expo-one-ocean-3433/>
- Fuentes, D. M. (2014). Arquitectura y Empresa. Obtenido de <https://arquitecturayempresa.es/noticia/fachada-responsiva-en-la-sede-del-abu-dhabi-investment-council>
- Índices de comandos térmicos — Índice climático termal universal, 1979-2020. (s. f.). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019> Índices de comandos térmicos — Índice climático termal universal, 1979-2020. (s. f.). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019>
- Juan Linietsky, Ariel Manzur and the Godot community. (2023). Godot Engine. Obtenido de Qué es Visual Scripting: https://docs.godotengine.org/es/stable/tutorials/scripting/visual_script/what_is_visual_scripting.html
- Ladybug.tools. (2024) Obtenido de <https://www.ladybug.tools/>
- Molinare, A. (9 de Noviembre de 2011). ¿Qué es el diseño paramétrico? Obtenido de ArchDaily: <https://www.archdaily.cl/cl/02-118243/%25c2%25bfque-es-el-diseno-parametrico>
- Revista Mundo HVAC&R. (6 de Marzo de 2018). mundohvacr.com. Obtenido de Envolvente, la clave de la eficiencia térmica: <https://www.mundohvacr.com/2018/03/envolvente-la-clave-de-la-eficiencia-termica/>
- Segui, P. (29 de Julio de 2022). OVACEN. Obtenido de OVACEN: <https://ovacen.com/disenio-parametrico-arquitectura/>
- Sol.Arq. (2023). sol-arq.mx. Obtenido de <https://www.sol-arq.mx/>: <https://www.sol-arq.mx/>
- The Invention Emporium. (28 de Mayo de 2021). The Invention Emporium. Obtenido de The Invention Emporium: <https://theinventionemporium.com/blog/prototipos-para-que-sirven/>
- Uribe, B. (11 de Agosto de 2016). archdaily. Obtenido de Iñaki Ábalos 'La estética sólo nos interesa si podemos explorar nuevas técnicas, formas y materiales en los edificios': <https://www.archdaily.mx/mx/792132/inaki-abalos-la-estetica-solo-nos-interesa-si-podemos-explorar-nuevas-tecnicas-formas-y-materiales-en-los-edificios>
- Wikiarquitectura. (8 de Octubre de 2020). WikiArquitectura. Obtenido de WikiArquitectura: <https://en.wikiarquitectura.com/building/al-bahar-towers/>
- Tesis: Corporan, A. (2024). *Envolvente Responsiva, cómo las nuevas tecnologías aportan a soluciones arquitectónicas*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, Santo Domingo.