

# MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN FACHADAS DE VIDRIO MEDIANTE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOMIMÉTICO

## ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN GLASS FACADES THROUGH BIOMIMETIC DESIGN STRATEGIES

## MELHORANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FACHADAS DE VIDRO POR MEIO DE ESTRATÉGIAS DE DESIGN BIOMIMÉTICO

### **Büşra Öztürk**

Master in Architecture  
Research Assistant, Department of Architecture  
Selçuk University, Konya, Turkey  
<https://orcid.org/0000-0001-8177-0653>  
[busra.ozturk@selcuk.edu.tr](mailto:busra.ozturk@selcuk.edu.tr) (Correspondence Author)

### **Güneş Mutlu-Avinç**

Doctor in Architecture  
Assistant Professor of what Department or faculty?  
Muş Alparslan University, Muş, Turkey  
<https://orcid.org/0000-0003-1049-2689>  
[gunesavinc@gmail.com](mailto:gunesavinc@gmail.com)

### **Semra Arslan-Selçuk**

Doctor in Architecture  
Associate professor and researcher, Department of Architecture  
Gazi University, Ankara, Turkey  
<https://orcid.org/0000-0002-2128-2858>  
[semraselcuk@gazi.edu.tr](mailto:semraselcuk@gazi.edu.tr)



## RESUMEN

La industria de la construcción, responsable de una gran proporción del consumo de energía, está buscando soluciones para reducir el consumo de energía. Este estudio propone fachadas biomiméticas para garantizar el confort térmico. En primer lugar, examinó los sistemas de fachadas biomiméticas en la literatura. Luego, analizó los métodos de termorregulación de la naturaleza, el nivel de biomimética y las estrategias desarrolladas por los seres vivos. Como resultado de los análisis, se amplió la información biológica relativa a los tres fenómenos seleccionados y se determinó cómo transferir el método de biomimética que podría estar en la envolvente del edificio. Se realizaron simulaciones de energía en la fachada de vidrio del baño Süleyman Pasha para evaluar la eficiencia energética de la envoltura. Se encontró que los métodos inspirados en la naturaleza contribuyeron significativamente al consumo de energía del edificio cuando se diseñaron los resultados de simulación de la fachada.

### Palabras clave

biomímesis, diseño de fachadas, eficiencia energética, termorregulación.

## ABSTRACT

The building industry, responsible for a large proportion of energy consumption, is looking for solutions to reduce energy consumption. This study proposes biomimetic facades to ensure thermal comfort. Firstly, it examined biomimetic façade systems in the literature. Then, it analyzed the thermoregulation methods of nature, the level of biomimicry, and the strategies used by living things. As a result of the analyses, biological information regarding the three selected phenomena was expanded upon, determining how to transfer the biomimicry method to a building envelope. Energy simulations were conducted on the glass façade of the Süleyman Pasha Bath to evaluate the envelope's energy efficiency. It was found that nature-inspired methods significantly contributed to the building's energy consumption when examining the simulation results of the façade designed.

### Keywords

biomimicry, facade design, energy efficiency, thermoregulation.

## RESUMO

A indústria da construção, responsável por grande parte do consumo de energia, procura soluções para reduzir o consumo de energia. Este estudo propõe fachadas biomiméticas para garantir conforto térmico. Primeiramente, examinou sistemas de fachadas biomiméticos na literatura. Em seguida, analisou os métodos de termorregulação da natureza, o nível de biomimética e as estratégias desenvolvidas pelos seres vivos. Como resultado das análises, a informação biológica sobre os três fenômenos selecionados foi ampliada e determinada como transferir o método de biomimética que poderia ser para a envolvente do edifício. Simulações energéticas foram realizadas na fachada de vidro do Süleyman Pasha Bath para avaliar a eficiência energética do envelope. Verificou-se que os métodos inspirados na natureza contribuíram significativamente para o consumo de energia do edifício quando os resultados da simulação da fachada projetada.

### Palavras-chave:

biomimética, design de fachadas, eficiência energética, termorregulação.

## INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo mundial de energía y las cambiantes condiciones climáticas han estado recientemente en la agenda de muchos sectores, en particular el sector de la construcción. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), el sector de la construcción representa un tercio del consumo total de energía (Agencia Internacional de Energía, 2019), y la mayor parte de la energía consumida en la construcción proviene de sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación (HVAC, por sus siglas en inglés) (Engin, 2012). En particular, cuando se utilizan grandes áreas vidriadas en fachadas, la carga de refrigeración aumenta durante el día y la carga de calefacción aumenta por la noche. Esta situación conduce a altos niveles de consumo de energía. Por esta razón, el sector de la construcción se está enfocando en métodos que utilizan fuentes de energía renovables para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases nocivos y llamar la atención sobre el diseño de edificios energéticamente eficientes. En esta línea, el diseño de edificios energéticamente eficientes tiene como objetivo proporcionar ventilación natural dirigiendo la luz del día y reduciendo la carga de calefacción y refrigeración requerida (Pacheco ve diğ., 2012). A este respecto, el confort térmico en los edificios se proporciona aumentando la eficiencia obtenida de los recursos naturales como el calor, la luz, la lluvia y el viento con métodos pasivos de eficiencia energética y creando un diseño sensible al clima (Kim ve Torres, 2021).

Se puede decir que la naturaleza también tiene mucho que ofrecer en términos de desarrollo de propuestas de eficiencia energética, como la regulación térmica y el diseño sensible al clima, para aumentar la eficiencia de los recursos naturales como el calor, la luz, la lluvia y el viento. En este contexto, se están analizando y aplicando a la arquitectura los métodos de regulación térmica que utilizan los seres vivos en la naturaleza para garantizar la eficiencia energética. En la naturaleza, la regulación térmica se conoce como termorregulación, que protege la temperatura corporal de un organismo de los cambios de factores externos y garantiza que permanezca dentro de un rango apropiado (Farchi Nachman, 2009). En este contexto, se están desarrollando diseños/materiales biomiméticos examinando ejemplos de termorregulación, aprendiendo de la naturaleza y beneficiándose mediante el desarrollo de tecnología. Al examinar la fisiología, morfología y comportamiento de los seres vivos en la naturaleza, se han desarrollado muchos métodos y se pueden encontrar soluciones a los problemas encontrados en las estructuras.

El hecho de que la naturaleza responda a los problemas que encuentra, hallando las soluciones más adecuadas, ha llevado al ser humano a estudiar la naturaleza a lo largo de la historia. Se ofrecen soluciones prácticas a muchos problemas de la vida diaria aprendiendo de la naturaleza. Este método, denominado diseño bioinformado/biomimesis/biomimética/biodiseño, se centra en asimilar el papel de la naturaleza y producir soluciones funcionales con la información obtenida. Este enfoque está en camino de convertirse en una rama de la ciencia que respalda el proceso de aprender, adaptarse y aplicar las cualidades de los organismos vivos o inertes. Aunque este método se define como "emular estrategias" (Zari, 2009), se está desarrollando como un campo que produce diseños innovadores que contienen soluciones para los problemas de la humanidad, recurriendo a soluciones biológicas (Mutlu Avinç y Arslan Selçuk, 2019).

Las fachadas son componentes importantes, reguladores de

energía directamente expuestos a factores externos y en contacto con fuentes de energía renovables (Tabadkani et al., 2021). Por esta razón, la literatura ha discutido amplia y recientemente propuestas de diseño de edificios energéticamente eficientes, que pueden termorregular el diseño de fachadas con enfoques biomiméticos. Por ejemplo, Badarnah et al. (2010) diseñaron el ladrillo estoma como material de fachada, considerándolo como una barrera térmica para proteger a la fachada del calor y distribuirlo adecuadamente. Este diseño propone una envoltura del edificio con un sistema de refrigeración para regiones de clima árido y cálido. Kim et al. (2023) diseñaron una fachada cinética utilizando materiales innovadores y sensibles a la luz del día (aleaciones con memoria de forma y actuadores) en un sistema neumático. El diseño biomimético de la fachada, inspirado en un módulo de hexagonal y una característica de estoma de planta, se analizó probando los resultados de la simulación y un prototipo.

Por otro lado, el estudio de fachadas desarrollado por Kalatha (2016) presenta propuestas para mejorar el confort interior y la ventilación. En el diseño de la fachada, que se basa en un principio de funcionamiento de las estomas, se han propuesto paneles sensibles que pueden cambiar de forma según la temperatura y los factores físicos. En el estudio de Aly et al. (2021) se desarrolló un prototipo de fachada utilizando la capacidad de retención de agua con el efecto capilar que se encuentra en las pieles de lagartos diablo espinosos que viven en el clima desértico. En un estudio de López et al. (2017), se propone un enfoque biomimético para fachadas de vidrio con altas pérdidas energéticas, considerando la relación entre la arquitectura y la biología. Mediante la creación de un conjunto de datos de adaptaciones de plantas, se propone una metodología que refleja la adaptación de los principios biológicos a los recursos arquitectónicos y a las nuevas tecnologías. En su estudio, Sheikh y Asghar (2019) presentan un diseño de fachada adaptativa biomimética para mejorar la eficiencia energética de fachadas de vidrio de gran altura en regiones con climas cálidos y húmedos, reduciendo la carga energética en un 32%. En un estudio de Paar y Petutschnigg (2016), el tema del enverdecimiento de la fachada se abordó considerando el crecimiento modular de las madrigueras de los perritos de la pradera y las colonias de mejillones. Para dar solución al efecto isla de calor urbano, al aumento del consumo energético debido al calentamiento global y al aumento del calentamiento de las ciudades, se ha desarrollado un concepto de diseño de fachadas con funciones de ventilación y refrigeración natural basado en principios biomiméticos.

Otro estudio de Faragalla y Asadi (2022) presenta una metodología que incluye diferentes tipologías, métodos y marcos conceptuales para el diseño de fachadas adaptativas, centrándose en los principios biomiméticos. Esta investigación destaca la importancia de la eficiencia energética en las primeras etapas del diseño. Mientras tanto, Kuru et al. (2019) abordaron la importancia de las envolventes biomiméticas adaptativas de los edificios para la eficiencia energética y, a través de la caracterización y las estrategias, examinaron las tecnologías actuales a través de un análisis comparativo. En su estudio, Sommese et al. (2022) investigaron envolventes de edificios sensibles e inteligentes. El objetivo de este estudio es llamar la atención sobre el potencial de la vasta base de datos de la naturaleza al examinar críticamente la tecnología actual en términos de eficiencia energética.

El estudio abordado en este artículo se basó en la hipótesis de que "las plantas y los animales que se encuentran en la

Tabla 1. Mecanismos del sistema de módulos de fachada – Alternativas

Module Form	Movement Axis	Movement Direction and Type	System Status - On	System Status - Half Open	System Status - Off	Structure Reference Sample
		Opening to the sides Folding system				CJ Blossom Park
		Folding along the axis Folding system				Kiefer Technic Showroom / Al-Bahr Towers
		Rotation around center Rotation				ThyssenKrupp Quartier Essen Q1
		Rotation around center Rotation				RMIT Design Hub
		Gathering Toward the Center Pneumatic System				Media-TIC Building
		Shift along axis Sliding System				Institut du Monde Arabe

naturaleza pueden proponer una solución biomimética al problema del confort térmico interior y el consumo excesivo de energía provocado por el uso de fachadas de vidrio, y se pueden lograr mejoras en el consumo de energía". Para este fin, el estudio analizó los principios y estrategias de termorregulación natural para prevenir el sobrecalentamiento (durante el día) y el sobreenfriamiento (en la noche). Los seres vivos se revisaron utilizando las palabras clave "refracción, prevención del calor, absorción de radiación, reducción de la irradiación, sobrecalentamiento, regulación del calor" en la base de datos AskNature, y los principios se han derivado del estudio de los métodos termorreguladores y mecanismos de trabajo de estos seres vivos. En base a estos principios, se han buscado soluciones para evitar el sobrecalentamiento y el sobreenfriamiento provocados por los cambios de temperatura en los sistemas de fachadas de vidrio. Para ello, se discutieron cinco plantas y cinco animales con métodos de termorregulación para la distribución y ganancia de calor, y se diseñó un sistema de vidrio de doble fachada para ser sostenible y eficiente energéticamente, inspirándose en los seres vivos. El estudio se analizó mediante un programa de simulación energética, un módulo innovador en el sistema de fachada de vidrio diseñado aprendiendo de la naturaleza.

### MECANISMOS DEL SISTEMA DE MÓDULOS DE FACHADA – ALTERNATIVAS

En las cambiantes condiciones tecnológicas actuales, se han logrado avances esenciales en materiales y técnicas. Gracias a estos desarrollos, los diseños cinéticos de fachadas, que se adaptan a esta y cambian según las condiciones ambientales, están cobrando protagonismo. Antes de decidirse por el diseño del sistema, este estudio analizó el módulo de fachada cinética utilizando técnicas desarrolladas en el módulo de fachada hexagonal regular, uno de los diagramas de Voronoi. Se determinaron alternativas para mecanismos de apertura y cierre sensibles a la luz del día utilizando el módulo de fachada hexagonal. Para decidir estas alternativas, se examinaron los diseños de fachadas cinéticas en la literatura y en los edificios con envolventes adaptativas. Se puede observar que técnicas específicas como el deslizamiento, plegado, giro y operación neumática son ampliamente utilizadas como mecanismos de apertura y cierre en módulos de fachada. Estas técnicas modelan y expresan los estados completamente cerrados, semiabiertos y completamente abiertos de los módulos de fachada diseñados para diferentes sistemas. Se espera que la fachada cinética, diseñada de acuerdo con principios biomiméticos y utilizando

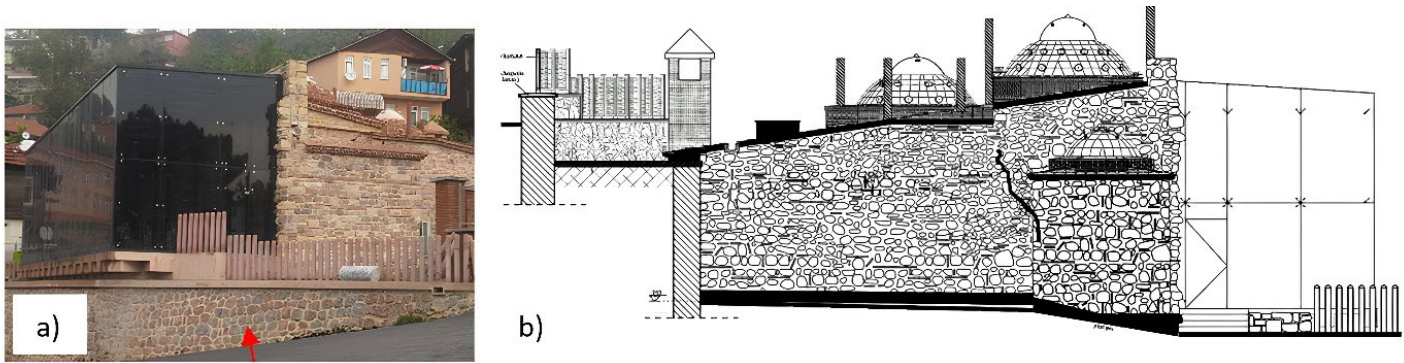


Figura 1. a) Secciones de baño Suleyman Pasha después de la reparación; b) Fachada noroeste del baño Suleyman Pasha (Güner Design - Arquitecto

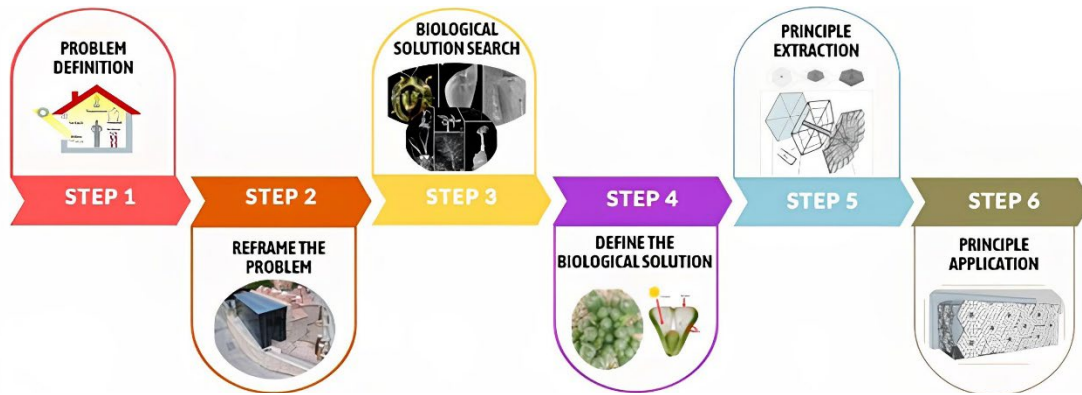


Figura 2. Enfoque orientado al problema utilizado en la investigación biomimética (Helms, Vattam y Goel, 2009, editado por el autor)

materiales técnicamente avanzados, resuelva los problemas de sobrecalentamiento y enfriamiento al controlar el acceso de la luz del día hacia el interior (Tabla 1).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El baño Suleyman Pasha en el distrito Akçaova de Izmit, el estudio de caso, fue construido durante el período otomano. El baño Suleyman Pasha es la estructura otomana más antigua que se conserva en Izmit. Aunque parte de la estructura ha sido demolida recientemente, la mayoría de los baños han sobrevivido hasta la actualidad. El derecho a evaluar y utilizar el baño con fines socioculturales se ha transferido a la Dirección General de Fundaciones, con el acuerdo del Municipio Metropolitano de Kocaeli. Se ha trabajado para garantizar que el baño en ruinas, que permaneció sin restaurar durante muchos años, recupere su función y se vuelva a utilizar (Polat et al., 2010). Construido a principios del período otomano, el baño tiene un área de baño doble tradicional diseñada por separado para hombres y mujeres. Como característica arquitectónica, el baño consta de vestuarios, salas cálidas y salas calientes. Sin embargo, desde que se demolió el vestuario, este ha sido reconstruido y convertido en una cafetería (Kocaeli Cultural Envanteri, 2011) (Figura 1).

La fachada de vidrio del área de la cafetería en el baño Suleyman Pasha, a la que se le ha dado una adición contemporánea como parte del proyecto de restauración, fue evaluada como

parte de este estudio. La cafetería está ubicada en el lado sur y experimenta sobrecalentamiento en verano y problemas de sobreenfriamiento en invierno, lo que requiere un alto consumo de energía para garantizar el confort interior. Tiene un problema esencial, que es que los sistemas de climatización provocan un consumo excesivo de energía para proporcionar las condiciones de confort necesarias para el espacio. Este estudio propone un sistema biomimético de fachada de vidrio que reducirá el consumo de energía, a la vez que aumentará las condiciones de confort interior, y se puede aplicar como una piel secundaria a la fachada existente.

Dentro del alcance de este estudio, se investigaron soluciones biomiméticas para aumentar el nivel de confort de la fachada de vidrio del área de la cafetería para el baño Suleyman Pasha, y así reducir la energía consumida. Ya que todos los organismos vivos pueden controlar las pérdidas y ganancias de energía termorregulando sus sistemas, se buscó una solución al problema identificado utilizando métodos aprendidos de la naturaleza. En este proceso, se utilizó el método de aproximación orientada a problemas, uno de los enfoques de biomimesis. Primero, se completó el proceso de identificación del problema. Luego, se buscaron soluciones al problema identificado desde la naturaleza, se derivaron ciertos principios y se propuso una solución. Además, la fachada diseñada en el estudio fue analizada en un programa de simulación energética (Design Builder), para ver los cambios en la carga de calefacción y refrigeración según las cualidades de los materiales. Finalmente, se propuso una solución para el problema, que era una solución

Tabla 2. Examen de las soluciones biomiméticas utilizadas en el diseño.

Referencia						
	Método	(URL-1)	(URL-2)	(URL-3)		
	Prevención del calor Preservación del calor	Ganancia de calor Preservación del calor	Ganancia de calor			
	Adaptación conductual	Adaptación física	Adaptación morfológica			

de fachada arquitectónica para la extensión contemporánea del baño histórico en Kocaeli (Figura 2).

### ESTUDIO DE CASO: DISEÑO BIOMIMÉTICO DE SISTEMAS DE FACHADAS DE VIDRIO

Se han estudiado métodos de termorregulación en seres vivos para abordar los problemas de sobrecalentamiento y sobreenfriamiento en los sistemas de fachadas de vidrio. Los seres vivos utilizan tres enfoques para lograr la termorregulación: conservación del calor, ganancia de calor y prevención del calor. Este estudio buscó palabras clave relacionadas con plantas y animales en la base de datos AskNature. Como resultado de la investigación, se examinaron criaturas con un método para prevenir el sobrecalentamiento y las ganancias de calor. Los seres vivos en climas áridos y desérticos han desarrollado diferentes estrategias para evitar el sobrecalentamiento. Estas estrategias generalmente se ven en las plantas como adaptaciones que regulan la pérdida de calor, abriendo y cerrando estomas, o como características morfológicas. Por otro lado, en animales se ha observado termorregulación regulando los cambios de color y las proporciones de área superficial de acuerdo con las características de la piel. En la segunda parte del estudio se analizaron las estrategias termorreguladoras de plantas y animales. Se encontraron plantas como la *fenestraria aurantiaca*, la hiedra inglesa, el pasto gigante, el edelweiss alpino y la planta kukumakranka, al igual que animales como el escarabajo tortuga, el camaleón, la mariposa morfo, el abejorro y la cucaracha silbante.

En la búsqueda de una solución biomimética al problema del estudio, se discutieron las adaptaciones tanto para la ganancia de calor como para la prevención del calor. Si bien se requiere una función de prevención del calor en los sistemas de fachadas de vidrio en edificios durante el día, se necesita una función de ganancia de calor cuando la temperatura desciende por la noche. El objetivo es diseñar una fachada de doble piel que refleje gran parte de la luz del día durante el día y actúe como capa aislante durante la noche. La fenestraria y las plantas marmota gigantes fueron consideradas como soluciones entre diez criaturas cuyos métodos de termorregulación fueron estudiados. Se cree que la fenestraria es una solución al problema del exceso de luz solar a la que está expuesto el edificio durante el día, ya que captura y corta el exceso de luz en el clima desértico y actúa como un lente. También se ha sugerido que el pasto gigante protege sus hojas internas cerrándose cuando baja la temperatura en las partes altas de las montañas, actuando como una capa aislante. El hecho de que esta planta se abra y se cierre en función de la temperatura

ha dado lugar a un diseño de fachada que actuaría como aislante cerrando las fachadas sensibles al calor de un edificio. Además, los módulos que se diseñarán están inspirados en el patrón Voronoi que se ve en las superficies del caparazón y la piel de las criaturas que se encuentran morfológicamente en la matemática de la naturaleza. Kahramanoğlu y Alp (2021), como resultado del análisis de la luz de día de los sistemas de fachada diseñados en formas alternativas, mostraron en su estudio que cuando se utiliza el diagrama de Voronoi, la incidencia de la luz en la fachada es mayor y se puede controlar al nivel deseado ajustando el grosor de las líneas. Por esta razón, se decidió utilizar los hexágonos regulares de los diagramas de Voronoi en el módulo de fachada de vidrio que se diseñará en el estudio (Tabla 2).

El proceso de diseño examinó los mecanismos estudiados en la naturaleza y sus métodos aplicados a la fachada. El método de dirigir y controlar el exceso de luz de la planta fenestraria, utilizado en el diseño de la fachada, se usó para resolver el problema de sobrecalentamiento en el módulo de la fachada. Además, en el diseño se consideró la capacidad de la planta de pasto gigante para cerrarse cuando baja la temperatura y proteger su sistema de los efectos de las heladas. De acuerdo con los principios aprendidos de estos dos proyectos, se decidió utilizar vidrio electrocrómico para dirigir el exceso de luz de día. Además, el sistema neumático, fabricado en material ETFE que se cierra a bajas temperaturas por la noche, está integrado a modo de doble fachada. Entre los módulos de fachada alternativos que se muestran en la Tabla 1 se diseñó un sistema neumático, con un actuador que se cierra por la noche a bajas temperaturas y recolecta calor durante el día (Figura 3).

Como parte del estudio, se diseñó un sistema de fachada que se comporta como la fenestraria y los pastos gigantes, adoptando principios termorreguladores. El diseño de este sistema tiene como objetivo reducir las cargas de calefacción y refrigeración causadas por los sistemas de fachada de vidrio. El sistema neumático, que está cerrado durante el día, se activa por la noche y actúa como una segunda fachada cubriendo la superficie de esta, protegiéndola de un enfriamiento excesivo. Además, el vidrio electrocrómico utilizado en la fachada durante el día asegurará que se refleje la luz por encima de una longitud de onda específica, evitando el sobrecalentamiento. El sistema de fachada de doble piel, de diseño biomimético, se aplicó al sistema de fachada de vidrio en el anexo contemporáneo ("espacio de la cafetería") del baño histórico Suleyman Pasha, y se llevaron a cabo los análisis de simulación energética (Figura 4). En los cálculos de

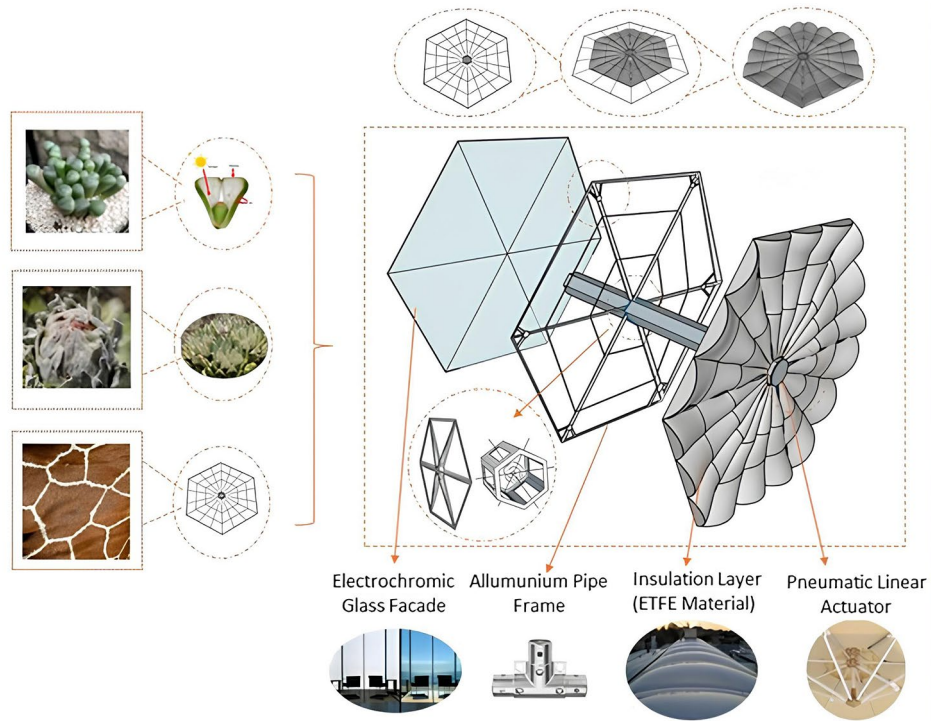


Figura 3. El módulo de fachada de doble piel se diseñó utilizando un enfoque biomimético.

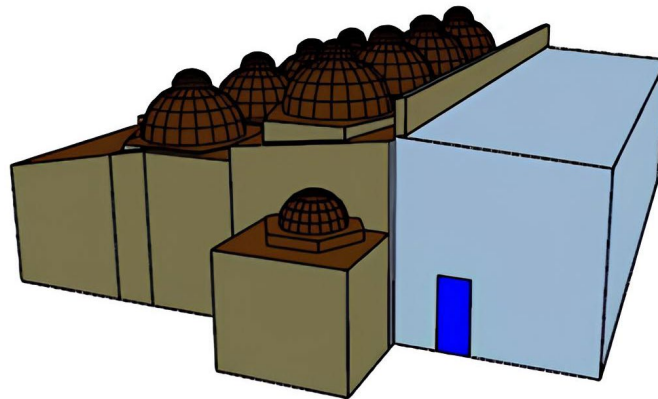


Figura 4. El modelo del baño Suleyman Pasha creado en el programa Design-Builder (Öztürk ,2023).

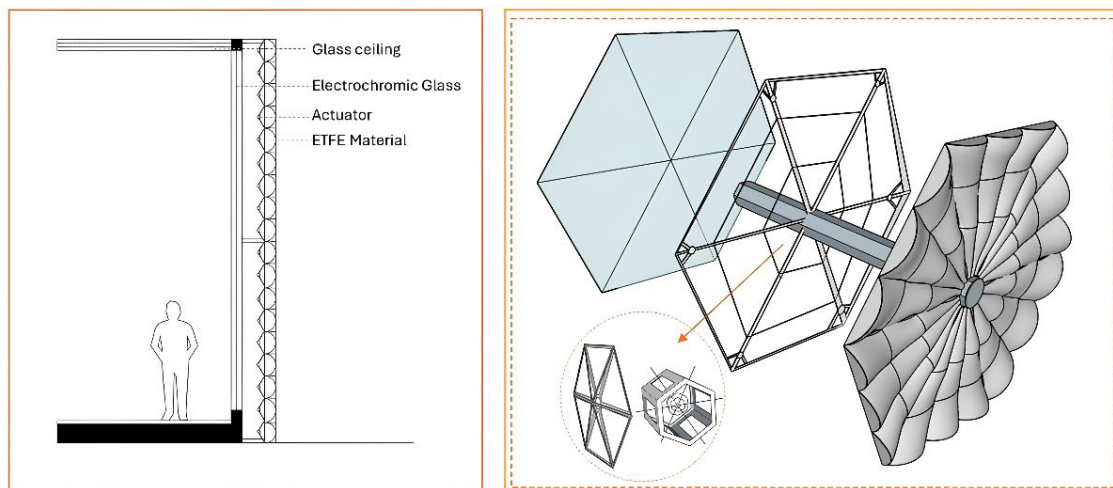


Figura 5. Aplicación del sistema de fachada de vidrio al espacio de la cafetería del baño Suleyman Pasha.

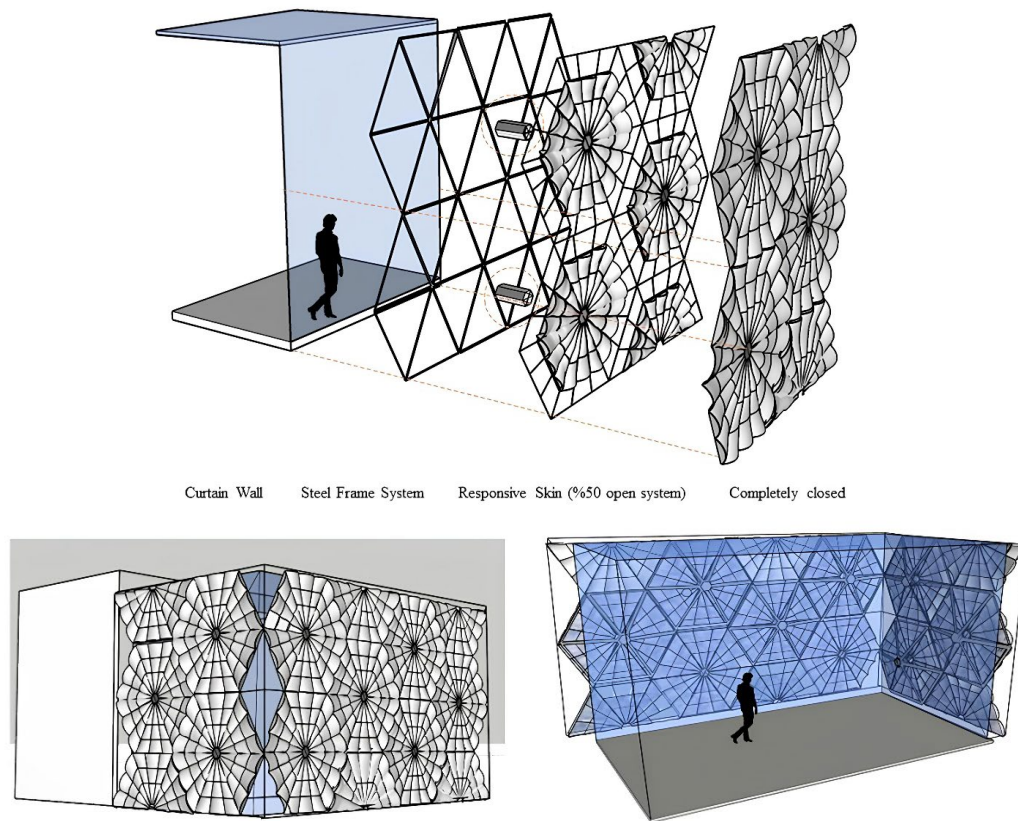


Figura 6. Aplicación del sistema de fachada de vidrio a la zona de la cafetería del baño Süleyman Pasha.

simulación energética, se ingresó al programa la información del sistema de fachada, que consta de tres escenarios diferentes, y se evaluó su efecto en los resultados de la carga de calefacción y refrigeración. El primer escenario se calculó utilizando las propiedades materiales existentes del edificio (Öztürk, 2023). Los resultados de la simulación se obtuvieron incorporando el sistema de vidrio electrocrómico de una sola capa en la información del material de la segunda y la doble fachada de vidrio electrocrómico en el tercer escenario (Figura 5 y Figura 6). Las propiedades del material del sistema de fachada de vidrio electrocrómico se obtuvieron del estudio de Lee y Tavil (2007) sobre el rendimiento del material de vidrio electrocrómico, y se definieron en el programa Design-Builder. Los valores totales de consumo de energía del edificio de los baños se compararon utilizando las propiedades del material determinadas y logradas en el programa Design-Builder e ingresando los datos climáticos de Kocaeli (Tabla 1 y Tabla 2).

Las propiedades térmicas de los materiales utilizados en el sistema de la fachada de vidrio existente del baño Suleyman Pasha, y los valores térmicos del sistema alternativo de fachada de vidrio electrocrómico de uno y dos pisos propuesto, se muestran en la Tabla 3 a continuación. Se obtuvieron tres resultados diferentes al ingresar los datos climáticos de la provincia de Kocaeli utilizando tres materiales diferentes en el programa de Design-Builder. El caso 1 de estos tres escenarios es el análisis de carga de energía total de calefacción, refrigeración y energía obtenido al definir las propiedades del material existente de la estructura del baño. En el caso 2, se definieron en el programa las propiedades térmicas del material de vidrio electrocrómico de una sola capa en el material de vidrio del espacio de la cafetería del edificio, y se realizaron análisis energéticos. En el caso 3, la

simulación se realizó definiendo las propiedades del material de vidrio electrocrómico revestido de doble capa y reflectante, para el sistema de fachada de vidrio. Los tipos de material de vidrio electrocrómico y las propiedades térmicas recomendadas en el estudio fueron tomados del estudio de Lee y Tavil (2007). Se definieron en el programa agregando las propiedades materiales del edificio y los datos climáticos (Tabla 3)

## DISCUSIÓN

El alza de la demanda energética del sector de la construcción y la energía de los sistemas utilizados para el confort de los ocupantes aumentan significativamente el consumo de energía. Por esta razón, están aumentando los intentos de reducir el consumo energético del edificio y garantizar el confort térmico en interiores. Este estudio aborda el problema del sobrecalentamiento y enfriamiento en fachadas de vidrio.

El sistema de fachada de vidrio de doble piel propuesto en el estudio se diseñó con un sistema neumático sensible a la temperatura. Se recomendó el vidrio electrocrómico para reducir los efectos adversos del exceso de luz en el interior durante el día. Los análisis de simulación se realizaron en dos tipos de vidrio electrocrómico utilizados en el diseño: una sola capa y doble capa. Se espera que el sistema de fachada de vidrio biomimético diseñado proporcione una solución al problema de sobrecalentamiento diurno del área de la cafetería del baño Suleyman Pasha. También se espera que el sistema neumático, que forma la segunda capa del sistema de la fachada, se cierre por la noche y actúe como aislante del



Tabla 3. Propiedades térmicas de los sistemas de fachada de vidrio y valores definidos en el programa.

Edificios	Materiales	Grosor (cm)	Conductividad térmica $\lambda$ (W/mK)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)
Análisis de la pared del espacio de la cafetería del edificio (CASO 1) (Öztürk, 2023)	Gris plateado templado	0,8 cm de ancho	0,052	U: 1,70
	Espacio de aire	0,05 cm	R: 0,11	
	Vidrio laminado templado	0,8 cm de ancho	0,052	
Análisis de paredes de sistemas de vidrio alternativos (CASO 2)	Vidrio electrocrómico	1 cm	0,010	U: 1,07
	Vidrio transparente de una sola capa	Coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC): 0,69 Transmitancia del vidrio (VT): 0,71 (Lee y Tavil, 2007)		
Análisis de pared del sistema de vidrio recomendado (CASO 3)	Vidrio electrocrómico	2 cm	0,011	U: 0,57
	Revestimiento reflectante de doble capa	SHGC: 0,17 VT: 0,10 (Lee y Tavil, 2007)		

Tabla 4. Valores totales de carga de calefacción y refrigeración según los resultados de la simulación energética.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Carga de calefacción (kWh)	23.357,71	19.549,33	15.876,61
Carga de refrigeración (kWh)	13.849,10	12.347,49	9.476,18

material de vidrio, evitando un enfriamiento excesivo en el interior. Para ver el efecto del sistema de fachada diseñado para este propósito en la carga anual total de calefacción y refrigeración de la estructura del baño, esto se modeló en el programa Design-Builder, y las definiciones de materiales y equipos utilizados para la calefacción de espacios se procesaron en el programa. Las cargas energéticas anuales se obtuvieron creando tres escenarios a través del modelo. De acuerdo con los resultados de la simulación, la carga de calefacción y refrigeración más alta se logra en el Caso 1. En el Caso 2 se observaron mejoras significativas tanto en las cargas de calefacción como de refrigeración, usando material de vidrio electrocrómico de una sola capa. La carga energética anual total del espacio disminuyó un 16% en comparación con el Caso 1. Cuando se examinan los resultados de la simulación, se observa una disminución en el consumo total de energía del edificio de aproximadamente un 32% entre el Caso 1 y el Caso 3 (Tabla 4).

## CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Para reducir el consumo de energía en el sector de la construcción a escala mundial, es fundamental centrarse en diseños energéticamente eficientes y llevar a cabo estudios interdisciplinarios en esta dirección. Los estudios de diseño de fachadas, particularmente aquellos inspirados en sistemas naturales, han alcanzado un punto crítico en la eficiencia energética de la envolvente del edificio. Dado que la envolvente del edificio actúa como un amortiguador entre los espacios interiores y exteriores, se pueden lograr ganancias significativas de energía aprendiendo de la naturaleza y diseñando sistemas que respondan con sensibilidad a la luz del día. En este estudio, se ha confirmado la hipótesis de que las soluciones biomiméticas podrían resolver el problema de las cargas de calefacción y refrigeración en los sistemas de fachadas de vidrio de los edificios

como resultado de investigaciones y análisis de simulación. Este estudio investigó plantas y animales para abordar los problemas de sobrecalentamiento y sobreenfriamiento en sistemas de fachadas de vidrio en ubicaciones con grandes diferencias de temperatura. Se propuso una solución de fachada arquitectónica basada en el principio termorregulador de las dos plantas seleccionadas como solución para el sistema de fachada. Se han llevado a cabo estudios sobre el diseño de la fachada utilizando plantas que responden a un calentamiento y enfriamiento excesivos. El sistema de fachada propuesto podría reflejar el exceso de luz durante las altas temperaturas diurnas. También reduciría la demanda de carga de refrigeración al disminuir el uso de aire acondicionado en el interior. Además, el sistema se apagaría por la noche y actuaría como capa aislante en la fachada durante las inclemencias meteorológicas cuando baje la temperatura. Si bien se recomienda el material de vidrio electrocrómico para solucionar el sobrecalentamiento en el sistema de doble fachada, el diseño del sistema neumático con material ETFE, que se activa a bajas temperaturas, formará la capa aislante.

Como parte del estudio, se llevó a cabo un análisis de simulación para probar el sistema de fachada diseñado y ver la tasa de consumo de energía. La fachada diseñada se analizó en un edificio ubicado en la provincia de Kocaeli, que recibió un espacio de cafetería (adición contemporánea) en el sistema de fachada de vidrio en la fachada sur después de la restauración. Dado que la adición contemporánea al edificio se encuentra en el lado sur, la comodidad interior en verano se ve afectada negativamente, lo que provoca un sobrecalentamiento. Cuando se examinaron los resultados de la simulación en tres situaciones diferentes en función de las propiedades del vidrio, se observó una mejora del 32% en la carga energética total utilizando una fachada de vidrio electrocrómico de doble capa. La búsqueda de soluciones a problemas arquitectónicos mediante el análisis de la naturaleza conduce, en este punto, al estudio de diseños innovadores de materiales biomiméticos. De esta manera, se pueden ofrecer soluciones sostenibles y energéticamente eficientes con un enfoque interdisciplinario.

## REFERENCIAS

Aly, Z., Ibrahim, A., & Abdelmohsen, S. (2021). Augmenting passive actuation of hygromorphic skins in desert climates: learning from thorny devil lizard skins. In *9th International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design*, American University in Cairo, Egypt.

Asknature (n.d.). <https://asknature.org/strategy/leaves-protect-from-freezing/>

Badarnah, L., A. (2015). A biophysical framework of heat regulation strategies for the design of biomimetic building envelopes. *Procedia Engineering*, 118,1225-1235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.474>

Badarnah, L., Farchi, Y. N., & Knaack, U. (2010). Solutions from nature for building envelope thermoregulation. *Design & Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, 5, 251. <https://doi.org/10.2495/DN100221>

Badarnah, L. & Kadri, U. A. (2015). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120–33. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>

Badarnah, L. (2017). Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. *Buildings*, 7(2), 40. <https://doi.org/10.3390/buildings7020040>

Cactus Kingdom (n.d.). <https://cactuskingdom.ca/product/fenestraria-aurantiaca-baby-toes-seed/>

Çağlar, S. (2020). Voronoi Diyagramları Dünyayı Anlamamızı Nasıl Sağlar? <https://www.matematiksel.org/voronoi-diyagramlari-dunyayi-anlamamizi-nasil-saglar/>

Engin, N. (2012). Enerji Etkin Tasarımda Pasif İklimlendirme: Doğal Havalandırma. *Tesisat Mühendisliği*, 129, 62-70. [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c8aa7c541085a2b\\_ek.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c8aa7c541085a2b_ek.pdf)

Faragalla, A. M., & Asadi, S. (2022). Biomimetic design for adaptive building façades: a paradigm shift towards environmentally conscious architecture. *Energies*, 15(15), 5390. <https://doi.org/10.3390/en15155390>

Farchi Nachman, Y. (2009). Learning from nature: Thermoregulation envelope, in Department of Building Technology. Delft University of Technology: Façade Design.

Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 30(5), 606–622. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.04.003>

Helms, M. E., Vattam, S. S., Goel, A. K., Yen, J., & Weissburg, M. (2008). Problem-driven and solution-based design: twin processes of biologically inspired design Silicon+Skin: Biological Processes and Computation: Proc. 28th Annual Conf. Assoc. Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA) (Minneapolis, Minnesota: University of Minnesota, 2008) 94–101.

International Energy Agency. Energy Efficiency (2019). Buildings, The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis.

ISO/TC266 (2015). Biomimetics Terminology, Concepts and Methodology (Berlin: Beuth) ISO 18458.

Kahramanoğlu, B., & Alp, N. Ç. (2021). Kinetik Sistemli Bina Cephelerinin Modelleme Yöntemlerinin İncelenmesi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5(1), 119-138. <https://doi.org/10.53600/ajesa.861479>

Kalatha, A. (2016). The water wall: A bio-inspired thermoregulative facade system. [Unpublished master thesis], Delft University of Technology, Netherlands.

Kim, K., & Torres, A. (2021). Integrated Façades for Building Energy Conservation; IC-AIRES, Lecture Notes in Networks and Systems; Springer: Cham, Switzerland; 361.

Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., & Fiorito, F. (2019). Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings. *Energy and Buildings*, 205, 109544. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544>

Lee, E. S., & Tavit, A. (2007). Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. *Building and Environment*, 42(6), 2439-2449. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.016>

Mutlu Avinç, G., & Arslan Selçuk, S. (2019). Mimari Tasarımda Biyomimetik Yaklaşımlar: Pavyonlar Üzerine Bir Araştırma. *Online Journal Of Art & Design*, 7(2), 92-107. <http://www.adjournal.net/articles/72/728.pdf>

Öztürk, Büşra., (2023). Çağdaş eklerin tarihi yapının enerji performansına etkisinin incelenmesi [MSc thesis]. Konya Teknik University, Institute of Graduate Education, Konya.

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>

Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019). Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>

Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: Towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850>

Speck, T., Speck, O., Beheshti, N., & McIntosh, A. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Design and Nature*, 4, 3–11. <https://doi.org/10.2495/DN080011>

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X. & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive façades: A review. *Automation in Construction*. 121, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>

Paar, M. J., & Petutschnigg, A. (2016). Biomimetic inspired, natural ventilated facade—A conceptual study. *Journal of Facade Design and Engineering*, 4(3-4), 131-142. <https://doi.org/10.3233/FDE-171645>

Vattam, S., Helms, M. E., & Goel, A. K. (2007). Biologically inspired innovation in engineering design: a cognitive study. <http://hdl.handle.net/1853/14346>

Zari, M. P. (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. In The SB07 New Zealand Sustainable Building Conference, 33-42. <https://www.semanticscholar.org/paper/BIOMIMETIC-APPROACHES-TO-ARCHITECTURAL-DESIGN-FOR-Zari/1a7b024096491c64beafc4d9b243f84a321cd697>