

COMPARACIÓN DE LOS CORTAVIENTOS TRADICIONALES Y CONTEMPORÁNEOS EN ZONAS CLIMÁTICAS CÁLIDAS Y SECAS Y CÁLIDAS Y HÚMEDAS

Recibido 07/08/2025
Aceptado 05/12/2025

COMPARISON OF TRADITIONAL AND CONTEMPORARY WINDBREAKERS IN HOT- DRY AND HOT-HUMID CLIMATE ZONES

COMPARAÇÃO ENTRE QUEBRA-VENTOS TRADICIONAIS E CONTEMPORÂNEOS EM ZONAS CLIMÁTICAS QUENTES E SECAS E QUENTES E ÚMIDAS

Pelin Akin

Doctor in Philosophy
Research Assistant (PhD), Faculty of Engineering and Architecture, Department of Architecture
Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş, Turkey
<https://orcid.org/0000-0003-0159-0623>
pelinakinn09@gmail.com

Elvan Kumtepe

Doctor in Philosophy
Research Assistant (PhD), Faculty of Architecture, Department of Architecture
Süleyman Demirel University, Isparta, Turkey
<https://orcid.org/0000-0003-0652-6188>
elvankumt@gmail.com



RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar comparativamente los sistemas de cortavientos tradicionales y contemporáneos utilizados en regiones climáticas cálidas y áridas, y cálidas y húmedas, en términos de eficacia estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje. La investigación adopta un marco simplificado de análisis de decisiones multicriterio (MCDA) integrado con un sistema de calificación de escala Likert, aplicado a ocho casos de asentamientos distintos. Los resultados revelan que los sistemas tradicionales presentan una alta eficiencia en la ventilación pasiva y una morfología que responde al clima. Por el contrario, los sistemas contemporáneos demuestran ventajas en cuanto a eficiencia energética gracias al uso de materiales sostenibles y soluciones tecnológicas avanzadas. Sin embargo, las aplicaciones contemporáneas tienden a mostrar una integración visual limitada con el contexto local y una mayor dependencia de los sistemas mecánicos. Al integrar los conocimientos medioambientales tradicionales con enfoques de diseño contemporáneos orientados al clima, este estudio ofrece una perspectiva global y multiescalar, lo que constituye una contribución innovadora a las estrategias de diseño arquitectónico sostenible.

Palabras clave

sistemas cortavientos, arquitectura sensible al clima, eficiencia energética, refrigeración pasiva, armonía visual, arquitectura tradicional, diseño sostenible de fachadas

ABSTRACT

This study aims to comparatively evaluate traditional and contemporary windbreaker systems used in hot-arid and hot-humid climate regions in terms of structural effectiveness, energy efficiency, and visual harmony with the landscape. The research adopts a simplified Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) framework integrated with a Likert-scale rating system, applied across a case study of eight different settlements. The findings reveal that traditional systems exhibit high efficiency in passive ventilation and climate-responsive morphology. In contrast, contemporary systems demonstrate advantages in energy efficiency through the use of sustainable materials and advanced technological solutions. However, contemporary applications tend to show limited visual integration with the local context and an increased dependence on mechanical systems. By integrating traditional environmental knowledge with contemporary climate-responsive design approaches, this study provides a comprehensive, multi-scalar perspective and an innovative contribution to sustainable architectural design strategies.

Keywords

windbreaker systems, climate-responsive architecture, energy efficiency, passive cooling, visual harmony, traditional architecture, sustainable facade design

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar, comparativamente, os sistemas tradicionais e contemporâneos de quebra-ventos utilizados em regiões climáticas quentes e áridas e quentes e úmidas, em termos de eficácia estrutural, eficiência energética e harmonia visual com a paisagem. A pesquisa adota uma estrutura simplificada de Análise de Decisão Multicritério (MCDA), integrada a um sistema de classificação em escala Likert, aplicada a oito casos distintos de assentamentos. Os resultados revelam que os sistemas tradicionais apresentam alta eficiência em ventilação passiva e morfologia responsiva ao clima. Em contrapartida, os sistemas contemporâneos demonstram vantagens em termos de eficiência energética graças ao uso de materiais sustentáveis e soluções tecnológicas avançadas. No entanto, as aplicações contemporâneas tendem a apresentar uma integração visual limitada com o contexto local e uma maior dependência de sistemas mecânicos. Ao integrar o conhecimento ambiental tradicional com abordagens contemporâneas de design responsivas ao clima, este estudo oferece uma perspectiva abrangente e multiescalar, contribuindo de forma inovadora para estratégias de design arquitetônico sustentável.

Palavras-chave

sistemas de proteção contra o vento, arquitetura sensível ao clima, eficiência energética, refrigeração passiva, harmonia visual, arquitetura tradicional, design sustentável de fachadas

INTRODUCCIÓN

El diseño sensible al clima es un principio fundamental de la arquitectura sostenible. En regiones cálidas y secas, así como en regiones cálidas y húmedas, la dirección e intensidad del viento influyen significativamente en el confort interior y el consumo de energía (Hemmatzadeh y Akgüç , 2023). La arquitectura tradicional ha integrado durante mucho tiempo sistemas pasivos de protección contra el viento, como badgir, mashrabiya y elementos de sombra de madera o piedra, para regular el flujo de aire, proporcionar sombra y mantener el confort térmico (Bagasi et al ., 2021; Lotfabadi y Hançer, 2019). Estos sistemas no solo mejoran el desempeño climático, sino que también preservan la armonía visual y cultural con el medio ambiente (Chohan et al., 2024). Sin embargo, la rápida urbanización y los procesos de construcción estandarizados han llevado a descuidar estas estrategias tradicionales, reemplazándolas por soluciones mecánicas y de alto consumo energético (Zahrawi y Aly, 2024; Kitsopoulou et al., 2024).

Estudios previos han destacado las ventajas térmicas y ambientales de los diseños tradicionales, como un ahorro de energía de hasta un 47% en regiones cálidas y secas y mejoras microclimáticas significativas mediante cortavientos basados en el paisaje (Dewalle y Heisler, 1988; Weninger et al., 2021). A pesar de esta evidencia, los estudios existentes aún carecen de un marco cuantitativo integrador para evaluar las dimensiones estructurales, energéticas y visuales de los sistemas de cortavientos en diversos contextos climáticos. Para abordar esta brecha, este estudio desarrolla un marco comparativo basado en MCDA, combinado con un sistema de calificación en escala Likert, para evaluar de manera sistemática el desempeño de los diseños tradicionales y contemporáneos. A diferencia de revisiones descriptivas anteriores, el modelo propuesto introduce métricas replicables y multicriterio que unen estrategias pasivas vernáculas y soluciones tecnológicas modernas, contribuyendo al avance del diseño arquitectónico sostenible y sensible al clima.

Este estudio evalúa comparativamente los sistemas de cortavientos tradicionales y contemporáneos en climas cálidos-secos y cálidos-húmedos, centrándose en su efectividad estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje circundante. Se han analizado ocho asentamientos de dos zonas climáticas y de distintos periodos históricos. Los resultados proporcionan un marco a múltiples escalas para reinterpretar el diseño sensible al clima en la arquitectura contemporánea y discuten el potencial de enfoques integrados que combinan el conocimiento tradicional con la innovación moderna.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

El concepto de diseño compatible con el clima ha surgido de diversas formas, especialmente en regiones con condiciones climáticas extremadamente cálidas y duras. Los cortavientos, que favorecen la ventilación natural y proporcionan aire

acondicionado pasivo, se han utilizado en aplicaciones arquitectónicas tradicionales y contemporáneas como una estrategia importante para aumentar el confort interior y contribuir a los objetivos de sostenibilidad al reducir el consumo de energía (Givoni, 1998; Bahadori, 2018).

SISTEMAS DE CORTAVIENTOS TRADICIONALES

Los sistemas tradicionales de cortavientos, un componente importante de la arquitectura sostenible en climas cálidos, utilizan eficazmente la ventilación natural para mejorar el confort interior y minimizar el consumo de energía. Entre ellos, las estructuras badgir (atrapavientos) se utilizan ampliamente en Irán y en la Península Arábiga para dirigir el flujo de aire en interiores y regular la temperatura. Los estudios de Yazd muestran que dichos sistemas pueden mantener las condiciones interiores por debajo de 20 °C en invierno y de 35 °C en verano, logrando un confort térmico con cero consumo de energía (Hemmatzadeh y Akgüç, 2023). Del mismo modo, Al-Ajmi et al. (2006) demostraron que el rendimiento de enfriamiento de su sistema varía según los parámetros geométricos, como la altura y la sección transversal.

El papel de los cortavientos tradicionales en la eficiencia energética se ha confirmado repetidamente. Soflaee y Shokouhian (2005) enfatizaron su contribución al enfriamiento natural, mientras que El-Shorbagy (2010) subrayó su importancia cultural y arquitectónica. El trabajo más reciente integra simulaciones computacionales para mejorar el rendimiento tradicional mediante análisis híbridos o basados en CFD (Sirror, 2024; Ghoulem et al., 2020). Estos sistemas reducen las cargas de enfriamiento, mejoran la calidad del aire interior y siguen siendo referencias clave para el diseño de edificios de bajo consumo energético (Ma et al., 2024; Jassim, 2018).

Aunque la literatura confirma la efectividad y la importancia cultural de los sistemas tradicionales de cortavientos, la mayoría de los estudios son específicos de casos y descriptivos, centrándose en contextos climáticos aislados sin criterios de evaluación estandarizados. Las evaluaciones comparativas y cuantitativas en todas las regiones siguen siendo limitadas y pocos estudios examinan cómo estos sistemas pasivos pueden adaptarse a los estándares energéticos contemporáneos. Este estudio aborda estas brechas al introducir un marco MCDA replicable y multicriterio que compara objetivamente las estrategias de cortavientos tradicionales y modernas, uniendo así las observaciones empíricas con el análisis sistemático del desempeño.

SISTEMAS DE CORTAVIENTOS CONTEMPORÁNEOS

Los sistemas de cortavientos contemporáneos han evolucionado desde enfoques pasivos tradicionales hasta diseños dinámicos y adaptativos respaldados por modelos computacionales y materiales avanzados (Kabošová et al., 2019; Akgün, 2021). La integración de compuestos de fibra

de carbono y nanomateriales mejora tanto la resistencia mecánica como la eficiencia de conversión de energía, lo que permite un mayor rendimiento en condiciones climáticas variables (Tolasa y Furi, 2025). Al combinar principios vernáculos con tecnologías modernas, los modelos híbridos recientes de cortavientos han mejorado la ventilación natural y la eficiencia energética en los edificios (Sirror, 2024).

Más allá de la arquitectura, los sistemas de cortavientos han cobrado importancia en la agricultura y en el diseño del paisaje como herramientas para la adaptación y la mitigación del clima. En el área agroforestal, mitigan los impactos climáticos y aumentan la productividad de los cultivos (Mume y Workalemahu, 2021), mientras que los diseños biointegrados y basados en materiales respaldan la resiliencia ambiental en contextos urbanos y rurales (Margolis y Robinson, 2007). Las estrategias orientadas a la ingeniería, como los sistemas de protección combinados para turbinas eólicas, aumentan la eficiencia operativa y prolongan la vida útil (Kaverin et al., 2024), lo que ilustra un cambio hacia el pensamiento de diseño basado en datos y optimizado para el rendimiento (Radha y Kistelegdi, 2016).

Ejemplos como la ciudad de Masdar, en los Emiratos Árabes Unidos, demuestran cómo los principios tradicionales del flujo de aire pueden reinterpretarse mediante sistemas híbridos para lograr ahorros sustanciales en el consumo de energía y en el enfriamiento (Reiche, 2010). De manera similar, los sistemas agrivoltaicos que integran la agricultura con la generación solar han mejorado la gestión de la carga eólica y la eficiencia en el uso de la tierra (Zahrawi y Aly, 2024).

Aunque los sistemas contemporáneos integran con éxito materiales avanzados y herramientas computacionales, la investigación actual a menudo se centra en la optimización tecnológica en lugar de una evaluación holística de la sostenibilidad. La literatura aún carece de marcos comparativos que vinculen el desempeño estructural, energético y visual en diversas aplicaciones, desde la arquitectura hasta el área agroforestal. Este estudio aborda esta brecha al ofrecer un marco de evaluación cuantitativo y multicriterio que posiciona a los cortavientos contemporáneos dentro de un paradigma de diseño sostenible más amplio, uniendo el desempeño ambiental con la conciencia cultural y contextual.

EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENVOLVENTE DEL EDIFICIO

El diseño de la envolvente del edificio juega un papel crucial en la mejora del confort térmico y la reducción de las pérdidas de energía. El aislamiento, la orientación y la selección de materiales adecuados pueden mejorar significativamente el rendimiento del edificio (Al-Homoud, 2004). Por ejemplo, las fachadas de alto rendimiento integran un espesor de aislamiento óptimo, resistencia térmica y control de la radiación, que varían según el clima (Ascione et al., 2015). Sin embargo, las diferencias en los códigos de edificación entre países han provocado un rendimiento energético inconsistente en climas similares. (Bienvenido-Huertas et al., 2019).

Los avances tecnológicos recientes han permitido que los sistemas de envolvente adaptativos, como elementos de aislamiento dinámico, ventanas inteligentes y fachadas verdes, proporcionen un control preciso de la energía y un mayor confort (Kumar et al., 2022; Kitsopoulou et al., 2024). Mientras que los cortavientos tradicionales se diseñaron principalmente para reducir las cargas de viento, las soluciones contemporáneas integran la ventilación y la optimización de la fachada, lo que reduce la dependencia del enfriamiento mecánico en climas cálidos. Por otro lado, las fachadas dinámicas emergentes y los materiales inteligentes, como los paneles cinéticos, los materiales de cambio de fase y los aerogeles, pueden reducir las demandas de enfriamiento hasta en un 20-25 % (Perino y Serra, 2015; Narbutis y Vanaga, 2023). Sin embargo, a pesar de su promesa, estas tecnologías enfrentan desafíos, entre ellos un alto costo y datos de rendimiento limitados a largo plazo (Almesbah y Wang, 2025).

Aunque los avances en la tecnología de envolventes han ampliado el potencial de ahorro de energía, la mayoría de los estudios aún se centran en la optimización técnica en lugar del desempeño ambiental integral. Los marcos comparativos que conectan elementos pasivos tradicionales (mashrabiya, jali, voladizos) con sistemas adaptativos modernos siguen siendo escasos y pocos trabajos cuantifican sus impactos climáticos y estéticos combinados. Este estudio aborda estas limitaciones mediante el desarrollo de un modelo de evaluación multicriterio que analiza las dimensiones estructurales, energéticas y visuales de los sistemas de fachadas basados en cortavientos, contribuyendo así a una comprensión holística del diseño de la envolvente sostenible.

METODOLOGÍA

Para investigar los sistemas de cortavientos desde varios ángulos, este estudio emplea una estrategia de investigación basada en técnicas mixtas, combinando el análisis de casos comparativos con métodos mixtos. La investigación compara y evalúa las soluciones de cortavientos, incluida su eficacia estructural, eficiencia energética y coherencia estética con el entorno circundante. Se realizó una evaluación sistemática e integral mediante técnicas de análisis de datos cualitativos y cuantitativos. El alcance de la investigación incluye países con ejemplos tradicionales y modernos en diferentes contextos geográficos y culturales ubicados en zonas de clima cálido-seco y cálido-húmedo. Hay ocho asentamientos incluidos en el estudio: Yazd (Irán), Shibam (Yemen), Ciudad de Masdar (Emiratos Árabes Unidos), Doha (Qatar), Bali (Indonesia), Kerala (India), Raffles Place (Singapur) y Nanjing (China) (Figura 2). Los sistemas de cortavientos tradicionales y modernos sensibles al clima en estos asentamientos han sido examinados desde una perspectiva amplia. En este contexto, se ha revelado cómo han evolucionado las aplicaciones de los sistemas de cortavientos en los ámbitos del clima, la región, la tecnología y la modernización.

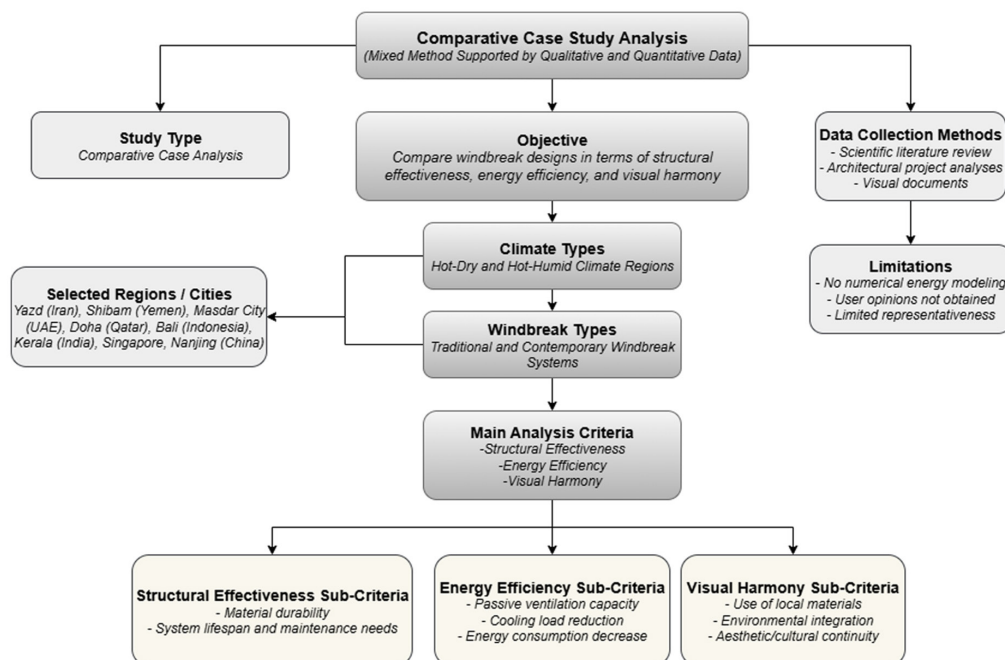


Figura 1. Diagrama de flujo del estudio. Fuente: Preparado por los autores.

En el proceso de análisis se utilizaron tres criterios principales: eficiencia estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje. El criterio de eficiencia estructural se evaluó en función del enfoque de diseño, el tipo de material, la durabilidad del material, la vida útil del sistema y los requisitos de mantenimiento. Se examinó la eficiencia energética de los sistemas en términos de eficiencia energética, capacidad de ventilación pasiva, carga de enfriamiento, emisiones de CO2 y potencial de reducción general del consumo de energía. Se consideró la armonía visual con el paisaje en cuanto al uso de materiales locales, la integración ambiental, la continuidad estética y las referencias culturales.

A los tres criterios se les asignó el mismo peso en la evaluación general. Esta decisión se basa en la premisa de que el rendimiento estructural, la eficiencia energética y la integración visual-cultural representan dimensiones complementarias e interdependientes de la sostenibilidad en el diseño arquitectónico. Tratarlos por igual evita el sesgo de una sola dimensión y respalda una comparación equilibrada entre los sistemas tradicionales y los contemporáneos. Enfoques similares, de igual peso, se aplican con frecuencia en estudios MCDA arquitectónicos en etapa inicial, en los que se requiere la normalización de datos provenientes de diversas fuentes (Saaty, 2008; Mardani et al., 2015).

Entre los métodos de recopilación de datos empleados se encuentran la revisión de la literatura científica, el análisis de proyectos arquitectónicos, el análisis de dibujos y materiales visuales, y el análisis cualitativo del contenido de diversas publicaciones científicas. El Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA) simplificado utilizado en el estudio proporciona un marco analítico que permite la evaluación sistemática de múltiples criterios en los procesos de toma

de decisiones y es particularmente eficaz para gestionar decisiones complejas, como las de arquitectura y diseño ambiental. La puntuación de tipo Likert es un método de medición preferido para cuantificar evaluaciones subjetivas y facilitar el análisis comparativo (Triantaphyllou, 2000; Belton y Stewart, 2012; Boone y Boone, 2012; Joshi et al., 2015). Los datos obtenidos en el estudio se integraron en un sistema de evaluación desarrollado con base en tres criterios principales y se examinaron en el marco de un Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA) simplificado. En este contexto, se analizó de manera comparativa el cumplimiento de los sistemas respecto de los criterios especificados mediante un método de puntuación tipo Likert que combinó datos cualitativos y cuantitativos. Se usó una escala de calificación de 1 a 5 para determinar el nivel de rendimiento de cada ejemplo; esta escala se definió como: "muy baja (1)", "baja (2)", "media (3)", "alta (4)" y "muy alta (5)". Los autores utilizaron la puntuación de la escala Likert basada en un análisis comparativo de datos publicados, documentación arquitectónica y evidencia visual. La puntuación se basó en el juicio de expertos, siguiendo un marco estructurado de evaluación a escala Likert comúnmente aplicado en la investigación de evaluación ambiental y arquitectónica (Malewczyk et al., 2024; Arslan y Yildirim, 2023). Para minimizar la subjetividad, se aplicó un proceso de verificación cruzada: cada estudio de caso se calificó de forma independiente y luego se reevaluó para llegar a un consenso. Este método de evaluación basado en expertos se alinea con las prácticas comunes en los estudios de evaluación arquitectónica y ambiental, en los que la interpretación cualitativa se cuantifica mediante sistemas de calificación estructurados (Boone y Boone, 2012; Joshi et al., 2015; Triantaphyllou, 2000). Este enfoque permite la reproducibilidad y la

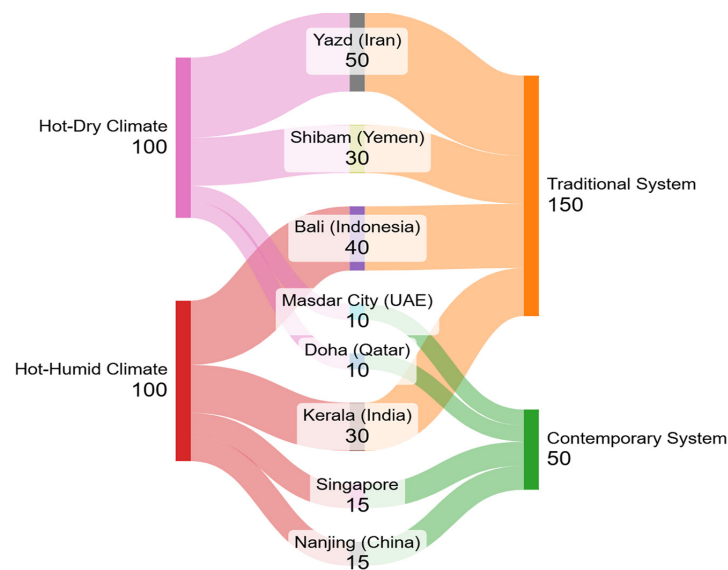


Figura 2. Diagrama de Sankey del estudio. Fuente: Preparado por los autores.

comparabilidad entre estudios de caso cuando los datos numéricos son limitados o heterogéneos. Las calificaciones se basaron en las explicaciones proporcionadas en la tabla, considerando subcriterios como el tipo de material empleado, la estructura formal, la adaptación climática y la integridad arquitectónica. Este enfoque ha permitido una evaluación integral de datos cualitativos y cuantitativos, revelando así diferencias en el rendimiento tanto dentro como entre los sistemas.

Este enfoque metodológico tiene como objetivo desarrollar una comprensión holística del rendimiento y de los efectos contextuales de los diseños de cortavientos. Sin embargo, las limitaciones del estudio incluyen la falta de modelado numérico de energía, la falta de comentarios de los usuarios y la limitada representatividad en ciertas áreas (por ejemplo, sistemas de aplicación de cortavientos tradicionales y contemporáneos en zonas climáticas cálidas y secas y cálidas y húmedas) (Figura 1).

El diagrama de Sankey de la Figura 2 muestra las relaciones de flujo entre los tipos de clima, las ciudades de los casos seleccionados y los tipos de sistemas de cortavientos. Los valores numéricos en el diagrama no son datos cuantitativos absolutos, sino indicadores proporcionales que reflejan la frecuencia de representación y la importancia tipológica en la literatura. Por ejemplo, se asignaron valores más altos a las ciudades de Yazd y Shibam, que son bien conocidas por sus aplicaciones de Badgir en climas cálidos y secos, dada su amplia representación en la literatura. Por el contrario, los ejemplos en asentamientos como la ciudad de Masdar y Nanjing, donde se aplican sistemas contemporáneos, se definieron como aplicaciones más limitadas, pero innovadoras, con un alto poder de muestreo. La visibilidad, la frecuencia de repetición y la profundidad de análisis de los estudios de caso en la literatura se consideraron para determinar su inclusión en el diagrama.

HALLAZGOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se evaluaron ocho sistemas de cortavientos diferentes encontrados en regiones de clima cálido, considerando el tipo de clima (cálido-seco y cálido-húmedo), el período (tradicional o contemporáneo) y tres criterios básicos de desempeño: efectividad estructural, eficiencia energética y armonía visual. Además, los hallazgos están respaldados por análisis gráficos comparativos. Las áreas de muestra se seleccionaron en zonas climáticas cálidas-secas (Yazd, Masdar, Shibam, Doha) y cálidas-húmedas (Bali, Singapur, Kerala, Nanjing), lo que permitió comparar sus diferencias (Tabla 1).

El sistema Badgir en Yazd es un ejemplo bien conocido de una forma tradicional de lidiar con el clima cálido y seco. Este método funciona bien para el enfriamiento pasivo porque utiliza torres de aire verticales entrelazadas en el tejido limitado de la carretera para dirigir el flujo de aire natural. Los informes de que el sistema puede reducir las temperaturas interiores hasta en 6 °C muestran cuán potente es su efecto de enfriamiento pasivo. Gracias a los materiales de tierra y su atractivo visual, integrados con la arquitectura local, exhiben un alto nivel de armonía con el paisaje (Al-Ajmi et al., 2006; Hejazi y Hejazi, 2014; Hemmatzadeh y Akgüç, 2023; Naghipour y Bakirova, 2024). El tejido de construcción tradicional en Shibam crea corredores pasivos de flujo de aire entre asentamientos densos y torres de barro, en un clima cálido y seco. El equilibrio de temperatura se mantiene gracias a sus propiedades de almacenamiento de calor. Visualmente, encaja armoniosamente con su entorno gracias a la unidad de sus materiales y colores (Tabla 1).

La ciudad de Masdar utiliza estructuras modulares y sistemas de fachada receptivos como modelo para una ciudad contemporánea y sostenible. Sin embargo,

su eficiencia estructural depende principalmente de los sistemas mecánicos. Aunque cuenta con el respaldo de la protección solar y de fuentes de energía renovables, su eficiencia energética sigue siendo moderada. Visualmente, su diseño de alta tecnología lucha por establecer una fuerte conexión estética con el entorno desértico (Reiche, 2010). Los sistemas de paneles contemporáneos en Doha ofrecen una contribución estructural limitada con sus elementos de fachada planos. La circulación del aire depende principalmente de los sistemas de aire acondicionado. La eficiencia energética es limitada porque depende en gran medida de métodos de enfriamiento activos en lugar de soluciones pasivas. Además, el lenguaje plano y moderno de la fachada se destaca visualmente respecto de su entorno (Tabla 1).


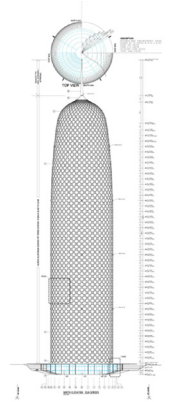

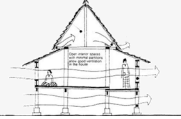





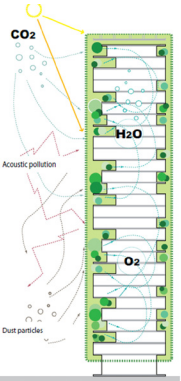
Los sistemas de cortavientos de madera en Bali tienen como objetivo que las personas se sientan más cómodas al proporcionar sombra natural y áreas solo parcialmente abiertas en un ambiente cálido y húmedo. Estos sistemas no cambian mucho la estructura y son de baja densidad, extendiéndose horizontalmente. No hacen un buen trabajo al controlar el flujo de aire ni al proporcionar aislamiento térmico, lo que los hace menos eficientes energéticamente. Por otro lado, el uso de materiales y vegetación locales contribuye a la integridad

visual. Los sistemas de cortavientos jali (celosía) utilizados en la arquitectura tradicional de Kerala, combinados con aleros altos y planificación columnar, se adaptan a las condiciones climáticas cálidas y húmedas. Este sistema, que requiere poco mantenimiento y utiliza materiales locales como piedra y madera, equilibra las temperaturas interiores mediante ventilación pasiva, al tiempo que mejora la eficiencia energética al permitir que la luz del día ingrese de manera controlada. Los elementos Jali regulan la permeabilidad visual para brindar privacidad, al tiempo que armonizan con el tejido local de manera estéticamente cohesiva (Tabla 1).

Los sistemas de fachadas verdes en Singapur tienen como objetivo mejorar el rendimiento de las fachadas mediante la ecologización vertical, como un enfoque contemporáneo. Su estructura modular y en capas los hace estructuralmente robustos. La vegetación reduce la ganancia solar y las temperaturas internas, lo que mejora la eficiencia energética. El enfoque de diseño biofílico (respetuoso con la naturaleza) respalda la integración visual del sistema con la ciudad (Safikhani y Baharvand, 2017; Kitsopoulou et al., 2024). En particular, el Bosque Vertical en Nanjing incorpora una densa vegetación vertical como una solución contemporánea de gran altura. Las fachadas

Tabla 1. Análisis de casos de estudio. Fuente: Preparado por los autores.

Asentamiento/ Aplicación	Imagen	Diagrama	Clima/Época	Eficiencia estructural	Eficiencia energética	Armonía visual
Yazd, Irán / Badgir (torre de viento)			Cálido y seco / Tradicional	<ul style="list-style-type: none"> - Badgir (torres de viento) - Calles estrechas - Materiales de adobe y ladrillo - Alta durabilidad - Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Resiliencia climática - Ventilación con energía cero - Temperatura interior por debajo de 35 °C en verano - Caída de temperatura interior de ~6 °C - 40-50% de ahorro energético 	<ul style="list-style-type: none"> - Integridad urbana - Armonía con el tejido urbano tradicional
Shibam, Yemen / Tejido urbano			Cálido y seco / Tradicional	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura densa de asentamientos - Torres de adobe de varios pisos - Estabilidad vertical - Baja resistencia - Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo de aire natural vertical 	<ul style="list-style-type: none"> - Integridad visual - Urbanización monótona - Integración con el tejido urbano
Ciudad de Masdar, Emiratos Árabes Unidos / La Torre del viento			Cálido y seco / Contemporáneo	<ul style="list-style-type: none"> - Torre de viento - Materiales ligeros de acero, vidrio, reciclables y de alta tecnología. - Alta resistencia - Alto mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas pasivos + evaporativos - ~50% de ahorro en refrigeración - Caída de la temperatura de 5-10 °C en la calle. - 60% de ahorro energético 	<ul style="list-style-type: none"> - Lejos de la estética local - Un enfoque moderno, - Referencia estructural al tejido tradicional

<p>Doha, Qatar / Torre de Doha</p>			<p>Cálido y seco / Contemporáneo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mashrabiya modernizada - Fachadas de doble piel - Sistemas de paneles compuestos - Módulos que dirigen el flujo del viento - Alto mantenimiento 	<p>Eficiencia mejorada de HVAC</p>	<p>Baja integración paisajística</p>
<p>Bali, Indonesia / Aleros anchos y marquesinas de madera</p>			<p>Cálido y húmedo / Tradicional</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Planos abiertos, - Aleros anchos - Sombreado de madera - Estructuras de madera y bambú - Baja resistencia 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta ventilación natural - Bajo control de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> - Integrado con el paisaje natural - Materiales naturales, formas tradicionales y respetuosos con el medio ambiente.
<p>Kerala, India / Jali</p>			<p>Cálido y húmedo / Tradicional</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Jali (celosía) - Aleros altos, - Planos en columnas - Materiales de piedra y madera - Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilación pasiva, - Uso controlado de la luz natural 	<ul style="list-style-type: none"> - Armonía con el tejido - Integridad estética - Armonía con la arquitectura tradicional
<p>Raffles Place, Singapur / CapitaGreen</p>			<p>Cálido y húmedo / Contemporáneo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Módulos de fachada verde, - Sistemas de estructura de acero y vidrio - Enfoque biomimético - Alto mantenimiento con sistemas semiautomáticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas híbridos - ahorro de energía del 30% con ventilación controlada por sensor en fachadas - Reducción del efecto UHI - Reducción del 15% al 25% en el consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Una sensación de extensión del tejido verde urbano. - Alta integración con la naturaleza
<p>Nanjing, China / Bosque vertical</p>			<p>Cálido y húmedo / Contemporáneo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Escudos de viento verdes, - Paisajismo vertical - Fachada verde - Enfoque biomimético - Material de concreto - Alto mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de emisiones de CO₂ (~25 toneladas/año); - Efecto de sombreado y cortavientos 	<p>Alta integración con la naturaleza Búsqueda de la forma estética</p>

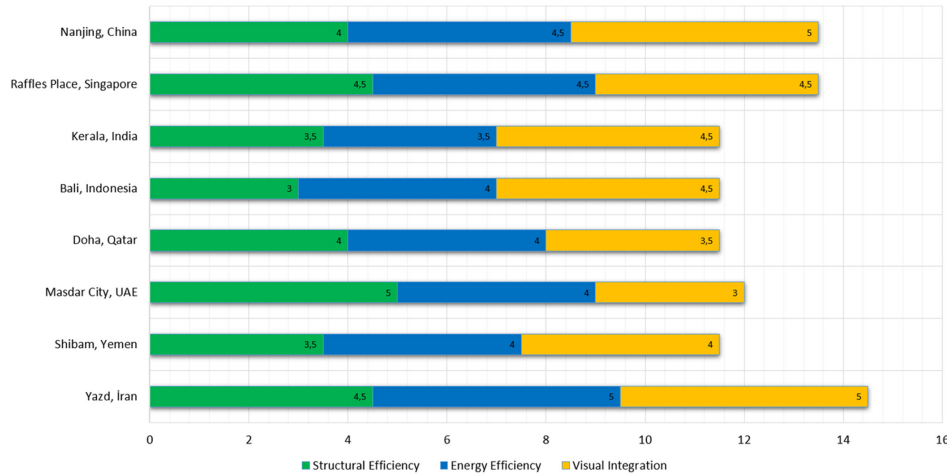


Figura 3. Comparación del rendimiento de los sistemas de cortavientos. Fuente: Preparado por los autores.

verdes en capas proporcionan integridad estructural y regulan las temperaturas interiores al crear un microclima. Se ha informado de que este sistema proporciona hasta un 25% de ahorro de energía. La densa estructura vegetal también le confiere a la fachada un carácter visual dinámico y crea una estética simbólica (Tabla 1).

Una tabla completa de estudio de caso a continuación revela las relaciones multidimensionales entre el contexto climático, el análisis estructural y la estética arquitectónica y evalúa comparativamente el rendimiento físico y visual de los sistemas de cortavientos (Tabla 1).

Este análisis comparativo examinó los sistemas de cortavientos en función de tres criterios principales utilizando un enfoque de Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA) simplificado: eficiencia estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje. Se han determinado los niveles de cumplimiento de los criterios de los sistemas analizados. Para determinar el nivel de cumplimiento de cada ejemplo, se utilizó una escala de calificación de tipo Likert de 1 a 5 que cubría parámetros tanto cualitativos como cuantitativos, donde 1 indica muy bajo, 2 indica bajo, 3 indica medio, 4 indica alto y 5 indica muy alto. Según las explicaciones de la tabla, a cada ejemplo se le ha asignado una puntuación de 1 a 5, considerando los materiales utilizados, la estructura formal, la idoneidad climática y la integridad arquitectónica (Figura 3).

El criterio de eficiencia estructural evalúa la capacidad del sistema para dirigir pasivamente el flujo de aire y la ventilación, así como su nivel de integración con la forma general de la estructura. Por ejemplo, el sistema de cortavientos Badgir en Yazd recibió la puntuación más alta (5) gracias a su compatibilidad con la red de calles estrechas y su guiado efectivo del flujo de aire pasivo. Sin embargo, los sistemas contemporáneos, como los paneles modulares en Doha, recibieron una puntuación más moderada (4) debido a su dependencia de los sistemas HVAC modernos. Los sistemas tradicionales como los de Bali, que tienen una organización vertical débil y se expanden horizontalmente,

recibieron puntuaciones más bajas debido a su baja eficiencia aerodinámica (Figura 3).

El criterio de eficiencia energética se relaciona con la capacidad del sistema para proporcionar enfriamiento pasivo, lograr temperaturas interiores más bajas y reducir el consumo total de energía. Los ejemplos de Yazd y de bosque vertical recibieron la puntuación más alta (5) porque lograron una reducción de la temperatura interior de hasta 6 °C y un ahorro de energía del 40-50 % (Hemmatzadeh y Akgül, 2023; Kitsopoulou et al., 2024). Sin embargo, a pesar de los beneficios de la ventilación natural, los sistemas como Shibam y Kerala obtuvieron puntajes moderados porque requieren un mantenimiento frecuente o tienen un aislamiento térmico limitado (Figura 3).

Se evaluó el criterio de armonía visual con el paisaje a partir de la relación estética que el sistema establece con el entorno urbano, los materiales locales y el contexto cultural. Los sistemas tradicionales compatibles con texturas locales, que se han convertido en íconos culturales (por ejemplo, en Yazd y Kerala), recibieron puntajes altos. Por el contrario, los sistemas con formas abstractas y modernistas, desconectados de su entorno (por ejemplo, la ciudad de Masdar), obtuvieron puntuaciones más bajas en armonía visual, a pesar de su funcionalidad. Este método de puntuación evaluó las estrategias de cortavientos en diferentes zonas climáticas mediante un enfoque holístico, considerando indicadores cuantitativos de desempeño (por ejemplo, efecto de enfriamiento y ahorro de energía) y evaluaciones cualitativas (por ejemplo, compatibilidad de materiales y continuidad cultural) (Figura 3).

Las ocho muestras examinadas en el estudio se evaluaron por separado según tres criterios principales: eficiencia estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje. Cada muestra se puntuó en una escala Likert de 5 puntos. La suma de los puntajes obtenidos en cada criterio se utilizó como indicador de desempeño combinado para evaluar el éxito general del sistema. Esta puntuación total es un indicador del éxito general del sistema.

Aunque calurosa y seca, Yazd, en Irán, tiene la mejor puntuación general (14,5), principalmente por sus elementos estructurales, su eficiencia energética y su armonía estética. Esto muestra qué tan bien funciona el sistema tradicional de cortavientos Badgir de Yazd, cómo se adapta al clima y cómo se encaja en la cultura. Los sistemas en Raffles Place, Singapur, y Nanning, China, con climas húmedos, obtuvieron 13,5 puntos, lo que los convierte en los siguientes mejor calificados después de Yazd. Estos sistemas modernos han obtenido altas calificaciones, en particular en cuanto a la armonía visual y la eficiencia energética. Esto demuestra la importancia de la integración tecnológica y de la armonía con la naturaleza en el diseño de sistemas de cortavientos. La ciudad de Masdar, EAU, tiene un alto rendimiento en eficiencia energética, pero obtiene una puntuación media (12) debido a la escasa armonía visual con el tejido urbano y a la escasa integración paisajística. Shibam, en Yemen, Doha, en Qatar, Bali, en Indonesia y Kerala, en India, tienen las puntuaciones más bajas entre los asentamientos evaluados, con 11,5 puntos. Los ejemplos muestran que la energía estructural y la armonía visual no se logran. Este criterio de evaluación revela que los ejemplos no solo deben cumplir con requisitos técnicos o formales, sino que también requieren un enfoque holístico de su contexto climático y cultural (Figura 3).

Las puntuaciones comparativamente bajas de Shibam, Doha, Bali y Kerala (11,5) indican que la eficiencia estructural, el rendimiento energético y la armonía visual no se lograron simultáneamente. En Shibam, la densa textura urbana proporciona estabilidad térmica, pero limita la ventilación natural y la adaptabilidad, lo que conduce a una disminución de la eficiencia estructural y energética. En Doha, a pesar de las mejoras tecnológicas en la fachada, la dependencia de los sistemas mecánicos de climatización disminuye la sostenibilidad general y aumenta las demandas de mantenimiento. Las estructuras de madera abiertas y orientadas horizontalmente de Bali proporcionan sombra, pero carecen de eficiencia aerodinámica y de aislamiento térmico, lo que se traduce en un menor rendimiento energético. En Kerala, aunque el sistema de cortavientos Jali garantiza la armonía cultural y estética, su aislamiento limitado y los frecuentes requisitos de mantenimiento reducen la resiliencia estructural. Estos hallazgos sugieren que los desajustes entre el diseño y el material, la integración insuficiente de los sistemas pasivos y activos y los desafíos de adaptación contextual son las causas principales de los bajos puntajes combinados. La comparación destaca que alcanzar un alto rendimiento holístico exige un equilibrio entre la innovación tecnológica, la idoneidad climática y la continuidad cultural.

CONCLUSIONES

Este estudio compara los sistemas de cortavientos tradicionales y contemporáneos en ocho asentamientos de distintas zonas climáticas, utilizando un marco de evaluación multicriterio basado en tres criterios principales: efectividad

estructural, eficiencia energética y armonía visual con el paisaje. Las evaluaciones han demostrado la necesidad de evaluar la adecuación tecnológica y los principios de diseño sostenible, entre ellos la continuidad cultural, la armonía contextual y la gestión climática pasiva. Los hallazgos revelan que los sistemas tradicionales aún ofrecen un alto rendimiento, en particular su potencial para dirigir el flujo de aire natural y reducir el consumo de energía. Al mismo tiempo, las aplicaciones contemporáneas interpretan este potencial de diferentes maneras a través de materiales innovadores, automatización y sistemas modulares.

En climas cálidos y secos, las soluciones tradicionales, como el Badgir, resultan especialmente eficientes en términos de eficiencia estructural. Por otro lado, ejemplos modernos como Nanjing y Raffles Place, que incorporan plantas, logran una notable eficiencia energética. Los ejemplos que logran con éxito una unidad estética con materiales regionales, formas consuetudinarias y el entorno circundante resultan más efectivos en términos de armonía visual. Mientras tanto, las intrusiones tecnológicas en sistemas modernos específicos han afectado negativamente la continuidad visual, generando diseños inconexos del entorno circundante.

En conclusión, este estudio destaca la importancia de integrar estrategias arquitectónicas en el diseño de sistemas de protección contra el viento para la arquitectura sostenible, basadas en experiencias locales y climáticas pasadas, pero reinterpretadas a través de la ingeniería contemporánea y las tecnologías de materiales. Este estudio proporcionó una evaluación comparativa de los sistemas de cortavientos tradicionales y contemporáneos en climas cálidos-secos y cálidos-húmedos mediante un marco simplificado de MCDA-Likert. Los hallazgos destacan que los sistemas tradicionales, como Badgir y Jali, demuestran una capacidad de respuesta climática e integración cultural superiores, mientras que los sistemas contemporáneos, aunque tecnológicamente avanzados, a menudo carecen de armonía contextual.

Para arquitectos y urbanistas, los resultados subrayan la necesidad de diseñar fachadas y sistemas exteriores que logren un equilibrio entre el rendimiento tecnológico y la adaptación climática y cultural. El estudio sugiere que reinterpretar las estrategias pasivas tradicionales a través de materiales contemporáneos y la fabricación digital podría conducir a diseños más sostenibles y sensibles al lugar. Los resultados pueden informar las pautas de diseño locales y los sistemas de certificación de sostenibilidad al enfatizar la ventilación pasiva, el sombreado y la compatibilidad cultural como indicadores integrales de desempeño en regiones cálidas. Las políticas de adaptación al clima urbano podrían beneficiarse de incorporar marcos de evaluación multicriterio simplificados, como el propuesto en esta investigación, para evaluar y clasificar las soluciones de fachada y de ventilación en las primeras etapas de diseño. Los estudios adicionales deberían integrar simulaciones dinámicas y mediciones in situ para validar

el rendimiento de los sistemas de cortavientos en escenarios climáticos cambiantes. El modelado cuantitativo del flujo de aire y del ahorro de energía, según las proyecciones futuras del CMIP6, podría ampliar la aplicabilidad de este marco. Además, extender la evaluación a climas mixtos o templados proporcionaría una comprensión más amplia de la adaptabilidad cultural y ambiental de dichos sistemas. En general, esta investigación une el conocimiento ambiental tradicional y las tecnologías sostenibles modernas, proporcionando un marco de evaluación interdisciplinario replicable para diseñar arquitecturas culturalmente resilientes y sensibles al clima.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRedit

Conceptualización, P. A. & E. K.; Curación De Datos, P. A. & E. K.; Análisis Formal, P. A. & E. K.; Adquisición De Financiación, P. A. & E. K.; Investigación, P. A. & E. K.; Metodología, P. A. & E. K.; Gestión De Proyectos, P. A. & E. K.; Recursos, P. A. & E. K.; Software, P. A. & E. K.; Supervisión, P. A. & E. K.; Validación, P. A. & E. K.; Visualización, P. A. & E. K.; Escritura-borrador original, P. A. & E. K.; Escritura-revisión y edición, P. A. & E. K.

AGRADECIMIENTOS

Los autores declaran que este estudio se realizó sin ningún apoyo financiero de organismos públicos, comerciales o sin fines de lucro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, M.S. (2004). The Effectiveness of Thermal Insulation in Different Types of Buildings in Hot Climates. *Journal of Building Physics*, 27(3), 235 - 247. <https://doi.org/10.1177/1097196304038368>
- Al-Ajmi, F., Loveday, D. L., & Hanby, V. I. (2006). The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment*, 41(3), 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>
- Almesbah, M., & Wang, J. (2025). Review of Dynamic Building Envelope Systems and Technologies Utilizing Renewable Energy Resources. *Designs*, 9(2), 41. <https://doi.org/10.3390/designs9020041>
- Akgün, Y. (2021). Contemporary Adaptive Systems in Architecture and Structural Engineering: State of the Art and Future Perspectives. *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA*, 4(1), 72-80. <https://doi.org/10.38027/ICCAUA2021165N10>
- Arslan, H. D., & Yıldırım, K. (2023). Perceptual evaluation of stadium façades. *Alexandria Engineering Journal*, 66, 391-404. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.015>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort. *Sustainability*, 7(8), 10809-10836. <https://doi.org/10.3390/su70810809>

Bagasi, A. A., Calautit, J. K., & Karban, A. S. (2021). Evaluation of the Integration of the Traditional Architectural Element Mashrabiya into the Ventilation Strategy for Buildings in Hot Climates. *Energies*, 14(3), 530. <https://doi.org/10.3390/en14030530>

Bahadori, M. N. (2018). Passive cooling systems in Iranian architecture in B. Sorensen (Ed.), *Renewable energy: Four Volume Set* (1 ed., Vol. 1, pp. 87-101). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315793245>

Belton, V., & Stewart, T. J. (2012). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>

Bienvenido-Huertas, D., Oliveira, M., Rubio-Bellido, C., & Marín, D. (2019). A Comparative Analysis of the International Regulation of Thermal Properties in Building Envelope. *Sustainability*, 11(20), 5574. <https://doi.org/10.3390/su11205574>

Boone, H. N., & Boone, D. A. (2012). Analyzing Likert data. *The Journal of Extension*, 50(2), 48. <https://doi.org/10.34068/joe.50.02.48>

Chohan, A. H., Awad, J., Elkahlout, Y., & Abuarkub, M. (2024). Evaluating windcatchers in UAE heritage architecture: A pathway to zero-energy cooling solutions. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(10), 102936. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102936>

Dewalle, D. R., & Heisler, G. M. (1988). 14. Use of windbreaks for home energy conservation. *Agriculture, ecosystems & environment*, 22-23, 243-260. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90024-2)

El-Shorbagy, A. M. (2010). Design with nature: windcatcher as a paradigm of natural ventilation device in buildings. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 10(03), 26-31. https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/civil_engineering/Design%20with.pdf

Ghoulam, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Zhong, F., & Calautit, J. (2020). Design of a Passive Downdraught Evaporative Cooling Windcatcher (PDEC-WC) System for Greenhouses in Hot Climates. *Energies*, 13(11), 2934. <https://doi.org/10.3390/en13112934>

Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.

Hemmatzadeh, Z., & Akgüç, A. (2023). A Comparison of Traditional and Contemporary Buildings by Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emission: A Case-Study from Tabriz-Iran. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(1), 62-75. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1161259>

Hejazi, B., & Hejazi, M. (2014). Persian Wind Towers: Architecture, Cooling Performance, and Seismic Behaviour. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 9(1), 56-70. <https://doi.org/10.2495/DNE-V9-N1-56-70>

Jassim, J. A. A. W. (2018). A new design of the minaret as a two-sides wind catcher integrated with the wing wall for passive evaporative cooling in hot climates. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(11), 3856-3873. https://jestec.taylors.edu.my/Vol%2013%20Issue%2011%20November%202018/13_11_29.pdf

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert scale: Explored and explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(4), 396-403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>

- Kabošová, L., Foged, I. W., Kmet, S., & Katunsky, D. (2019). Hybrid design method for wind-adaptive architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 17(4), 307-322. <https://doi.org/10.1177/1478077119886528>
- Kaverin, V., Nurmaganbetova, G., Em, G., Issenov, S., Tatkeyeva, G., & Maussymbayeva, A. (2024). Combined Wind Turbine Protection System. *Energies*, 17(20), 5074. <https://doi.org/10.3390/en17205074>
- Kitsopoulou, A., Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2024). An Up-to-Date Review of Passive Building Envelope Technologies for Sustainable Design. *Energies*, 17(16), 4039. <https://doi.org/10.3390/en17164039>
- Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., & Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. *Cleaner engineering and technology*, 11, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100555>
- Lotfabadi, P., & Hançer, P. (2019). A Comparative Study of Traditional and Contemporary Building Envelope Construction Techniques in Terms of Thermal Comfort and Energy Efficiency in Hot and Humid Climates. *Sustainability*, 11(13), 3582. <https://doi.org/10.3390/su11133582>
- Ma, Q., Qian, G., Yu, M., Li, L., & Wei, X. (2024). Performance of Windcatchers in Improving Indoor Air Quality, Thermal Comfort, and Energy Efficiency: A Review. *Sustainability*, 16(20), 9039. <https://doi.org/10.3390/su16209039>
- Malewczyk, M., Taraszewicz, A., & Czyż, P. (2024). Visual Perception of Regularity and the Composition Pattern Type of the Facade. *Buildings*, 14(5), 1389. <https://doi.org/10.3390/buildings14051389>
- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014. *Expert systems with Applications*, 42(8), 4126-4148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003>
- Margolis, L., & Robinson, A. (2007). *Living systems: innovative materials and technologies for landscape architecture*. Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8297-1>
- Mume, I. D., & Workalemahu, S. (2021). Review on windbreaks agroforestry as a climate smart agriculture practices. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(6), 342-347. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20210906.12>
- Naghipour, P., & Bakirova, T. (2024 March 7). *Investigating windcatcher in sustainable traditional architecture and its impact in clean energy (Case Study: Yazd and Sirjan Cities in Iran)*. 3rd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. <https://isnac.ir/XGCA-HKABA>
- Narbutis, J., & Vanaga, R. (2023). Revolutionizing the building envelope: a comprehensive scientific review of innovative technologies for reduced emissions. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 724-737. <https://doi.org/10.2478/tuetct-2023-0053>
- Perino, M., & Serra, V. (2015). Switching from static to adaptable and dynamic building envelopes: A paradigm shift for the energy efficiency in buildings. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), 143-163. <https://doi.org/10.7480/jfde.2015.2.1015>
- Radha, C. H., & Kistelegdi, I. (2016, March 26-27). Efficient natural ventilation in traditional and contemporary houses in hot and dry climate. *Proc. of 2nd International Conference on Architecture, Structure and Civil Engineering* (pp. 67-75). <http://dx.doi.org/10.17758/UR.U0316317>
- Reiche, D. (2010). Renewable energy policies in the Gulf countries: A case study of the carbon-neutral "Masdar City" in Abu Dhabi. *Energy policy*, 38(1), 378-382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.028>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=17590>
- Safikhani, T., & Baharvand, M. (2017). Evaluating the Effective Distance Between Living Walls and Wall Surfaces. *Energy and Buildings*, 150, 498-506. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.029>
- Sirror, H. (2024). Innovative Approaches to Windcatcher Design: A Review on Balancing Tradition Sustainability and Modern Technologies for Enhanced Performance. *Energies*, 17(22), 5770. <https://doi.org/10.3390/en17225770>
- Soflaee, F., & Shokouhian, M. (2005, May). *Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran*. International Conference Passive and Low Energy Cooling For The Built Environment (PALENC 2005), Greece, Santorini. https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/lnive/palenc/2005/Soflaee.pdf
- Tolasa, D. G., & Furi, A. T. (2025). The role of advanced materials in the optimization of wind energy systems: A physics-based approach. *Acceleron Aerospace Journal*, 4(1), 847-857. <https://doi.org/10.61359/11.2106-2504>
- Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods in E. Triantaphyllou, *Multi-criteria decision making methods: A comparative study* (1 ed., pp. 5-21). Springer Nueva York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- Weninger, T., Scheper, S., Lackóová, L., Kitzler, B., Gartner, K., King, N. W., Cornelis, W., Strauss, P., & Michel, K. (2021). Ecosystem services of tree windbreaks in rural landscapes: A systematic review. *Environmental Research Letters*, 16(10), 103002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1d0d>
- Zahrawi, A. A., & Aly, A. M. (2024). A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8271. <https://doi.org/10.3390/su16188271>