



Optimización multiobjetivo de protecciones solares fijas para reducir requerimientos energéticos en clima árido templado frío

Multi-objective optimization of fixed solar protections to reduce energy requirements in a temperate cold arid climate

ALICIA BETMAN

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía-CONICET, Argentina
abetman@mendoza-conicet.gob.ar

JULIETA BALTER

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía-CONICET, Argentina
jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

CAROLINA GANEM

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía-CONICET, Argentina
Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN El enfoque paramétrico utilizado en este estudio explora diversos escenarios de diseño de parasoles en las fases iniciales del proyecto. El objetivo es reducir los requerimientos energéticos anuales en climas templados áridos fríos, como el de Mendoza BWk, según Köppen. Se implementa un flujo de trabajo que integra simulaciones computacionales y análisis de datos para evaluar múltiples configuraciones geométricas de protecciones solares fijas en un modelo de estudio. El algoritmo NSGA II se emplea para realizar una optimización multiobjetivo, identificando los diseños ubicados en la frontera de Pareto. Posteriormente, se aplica el algoritmo de clustering K-Means para agrupar estas soluciones en 10 propuestas de diseño. Los resultados indican que, a pesar de la influencia de ciertos parámetros, un diseño adecuado de protección solar puede equilibrar eficazmente la demanda energética. Esta metodología, adaptable a proyectos más complejos, resulta una herramienta esencial para mejorar el rendimiento energético desde etapas tempranas de diseño.

ABSTRACT The parametric approach used in this study explores various solar shading design scenarios during the early stages of the project. The objective is to reduce annual energy requirements in cold, arid, temperate climates, such as Mendoza, classified as BWk in the Köppen system. A workflow integrating computational simulations and data analysis is implemented to evaluate multiple geometric configurations of fixed solar shading on a study model. The NSGA-II algorithm is employed for multi-objective optimization, identifying designs located on the Pareto front. Subsequently, the K-Means clustering algorithm is applied to group these solutions into ten design proposals. The results indicate that, despite variations in certain parameters, a well-designed solar shading system can effectively balance energy demand. This methodology, adaptable to more complex projects, serves as an essential tool for improving energy performance from the early design stages.

PALABRAS CLAVE eficiencia energética, optimización multiobjetivo, protecciones solares, simulación paramétrica, clima árido templado frío

KEYWORDS energy efficiency, multi-objective optimization, shading devices, parametric simulation, cold arid temperate climate

Recibido: 13/09/2024
Revisado: 28/02/2025
Aceptado: 07/03/2025
Publicado: 29/07/2025



Cómo citar este artículo/How to cite this article: Betman, A., Batler, J. y Ganem, C. (2025). Optimización multiobjetivo de protecciones solares fijas para reducir requerimientos energéticos en clima árido templado frío. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 14(28), 25-37. <https://doi.org/10.18537/est.v014.n028.a02>

1. Introducción

El consumo energético es el principal motor de la transformación ambiental inducida por la actividad humana en el planeta, destacando el aumento del efecto invernadero como un cambio notable. Este incremento se debe principalmente a las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la quema de combustibles fósiles.

En este contexto, el sector edilicio desempeña un papel significativo, con una proyección de aumento en sus consumos de energía para las próximas décadas. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2019), las construcciones urbanas consumen aproximadamente el 40% de la energía global, el 25% del agua global y el 40% de los recursos globales, siendo responsables del 33% del total de emisiones de efecto invernadero. Por esta razón, la Unión Europea se ha propuesto reducir dichos gases en un 90% para el año 2050, lo que ha llevado a la promulgación de leyes con el objetivo de fomentar el uso de energías renovables e impulsar a la industria de la construcción a diseñar nuevas alternativas y a enfocarse en la eficiencia energética de las envolventes edilicias (Unión Europea, 2018).

En cuanto al contexto de América del Sur, se prevé un aumento de la temperatura entre 1,5 y 5,5° C con impactos significativos en las latitudes subtropicales, (Cabré, et al. 2016), lo que se traducirá en un aumento de la demanda de refrigeración en los edificios. Este incremento de la temperatura global tiene implicaciones directas para el consumo energético y las emisiones asociadas, con una demanda de energía para enfriamiento que se ha duplicado en las primeras dos décadas del siglo XXI y que se espera se triplique para 2050 (Ganem et al., 2020; IEA, 2019).

Sin embargo, a pesar de los avances en eficiencia energética, muchos edificios continúan utilizando sistemas mecánicos de enfriamiento que representan cerca del 20% del consumo global de electricidad en edificios (IEA, 2019). En Argentina, el aumento proyectado de las temperaturas, especialmente en la temporada estival, destaca la urgencia de implementar medidas de mitigación y adaptación (Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético, 2019; Servicio Meteorológico Nacional, 2023). La adaptación a estos cambios exige la optimización de estrategias de sombreado pasivo y el desarrollo de tecnologías avanzadas de enfriamiento (Flores-Larsen et al., 2019).

De este modo, el acondicionamiento térmico pasivo emerge como una estrategia eficaz para la reducción de las demandas energéticas. Este enfoque requiere un análisis detallado de las variables ambientales y una evaluación técnica y económica que permita dimensionar adecuadamente los sistemas. La envolvente del edificio, en interacción directa con el exterior, juega un papel crucial en la eficiencia energética, dado que aproximadamente el 75% de las pérdidas o ganancias de calor se producen a través de ella (Aydin y Mihlayanlar, 2020). Las aberturas o ventanas en los

edificios son elementos clave para el control térmico, demandando una cuidadosa consideración desde las etapas iniciales del diseño. Según Tourma y Ouahrani, (2018) las superficies acristaladas representan el componente más vulnerable frente a las condiciones ambientales exteriores. Esto deriva en la necesidad de implementar medidas para minimizar la ganancia de calor y maximizar el uso eficiente de la luz natural (Grynning et al., 2017). El diseño y dimensionamiento de estas aberturas constituye un vínculo crítico entre la arquitectura y la gestión energética (Yong et al., 2017). La relación ventana-pared WWR, por sus siglas en inglés (Window to Wall Ratio) y las características del acristalamiento tienen un impacto significativo en la eficiencia energética y en el confort térmico y visual de los espacios (Krstić-Furundžić et al., 2019). Aunque el vidrio ha sido históricamente considerado un material simbólico de poder y avance tecnológico debido a su ligereza y transparencia, su uso excesivo plantea desafíos significativos, como la entrada de radiación UV, que intensifica el efecto invernadero y sobrecalienta los espacios interiores. Por ello, la optimización de dispositivos de sombreado en edificios se ha convertido en un área de investigación crítica para mejorar el diseño e integración de elementos de sombra en las fachadas (Mangkuto et al., 2021).

Por otro lado, el diseño asistido por algoritmos ofrece el potencial para explorar diferentes configuraciones y montajes, permitiendo estudios diversos (Koçak y Alaçam, 2023). En este contexto, el algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II ha demostrado ser altamente efectivo en la optimización del rendimiento energético de los edificios mediante el análisis de variables como el tipo de ventana, el sombreado y la orientación en diferentes regiones climáticas. Este enfoque ha logrado reducciones significativas en el consumo energético y en el porcentaje de insatisfacción previsto en varios estudios. Por ejemplo, en China, la optimización de dispositivos de protección solar permitió una reducción promedio del 26,70% en el consumo energético para enfriamiento (Zhao y Du, 2020). En Irán, se reportaron reducciones de entre el 2,8% y el 47,8% en los consumos (Naderi et al., 2020). En Noruega, la optimización de variables de sombreado resultó en una reducción del 77% en el consumo energético (Rabani et al., 2021), mientras que, en los Estados Unidos, el uso de persianas aisladas conmutables mostró un potencial de reducción de hasta el 11,4% (Dabbagh y Krarti, 2022).

En el contexto específico de este trabajo, Mendoza, Argentina, se caracteriza por un clima árido templado/frío y alta radiación solar, por lo que, la presencia de fachadas acristaladas sin protección adecuada puede resultar en un consumo energético elevado. En línea con esto, los dispositivos de control solar, especialmente aquellos instalados en el exterior de la envolvente edilicia, son esenciales para equilibrar la protección solar con la estética arquitectónica. A partir de lo expuesto, el presente trabajo plantea la aplicación de simulación paramétrica y optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos desde las etapas tempranas del

diseño. El objetivo es identificar soluciones efectivas para protecciones solares fijas, con el fin de reducir significativamente los requerimientos energéticos de climatización e iluminación.

2. Métodos

Se trabaja mediante un box de estudio diseñado siguiendo las dimensiones estándar de un dormitorio, de acuerdo con las tipologías habitacionales empleadas por el Instituto Provincial de la Vivienda de Mendoza. Las mismas corresponden a un espacio de 3 metros de ancho por 3 metros de largo, con una altura de 2,7 metros.

Para la construcción del modelo, se utilizó el software libre de diseño paramétrico Grasshopper junto con el complemento visualizador Rhinoceros 3D, utilizando una licencia educacional por tres meses. Se asignaron propiedades paramétricas y no paramétricas para desarrollar el box de estudio. En la Figura 1 se observa el esquema metodológico.

Para el análisis energético, se incorporaron los complementos Ladybug y Honeybee, los cuales permiten la importación de datos climáticos de Energy Plus Weather Data (EPW) y la realización de cálculos con motores reconocidos como EnergyPlus, Daysim y Radiance. Además, se utilizó la interfaz gráfica de OpenStudio, que vincula el modelo tridimensional con la biblioteca de herramientas de simulación, asignándole propiedades al modelo 3D para realizar simulaciones. Mediante la configuración de los termostatos y setpoints, se buscó determinar las demandas energéticas de refrigeración, calefacción e iluminación (kWh/m² año).

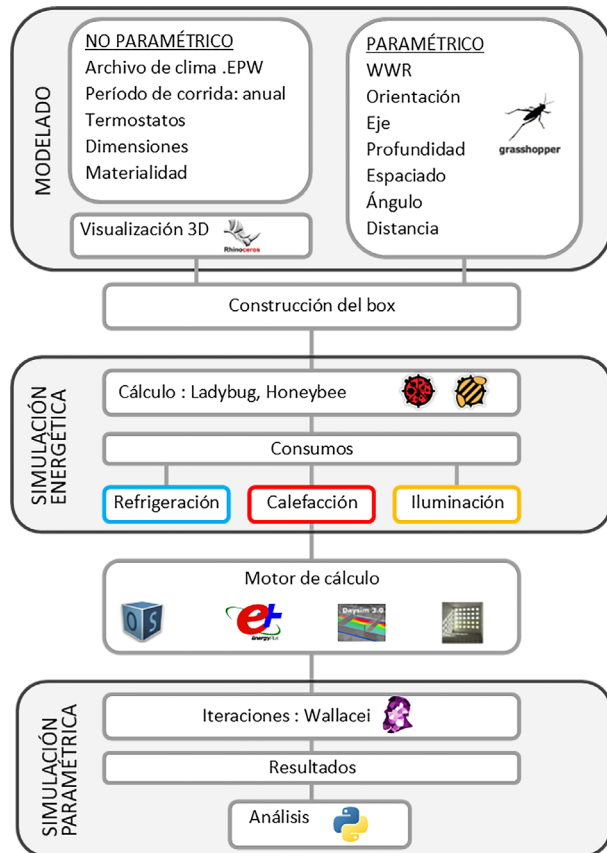


Figura 1: Esquema metodológico. (2024)

2.1. Datos meteorológicos

El sitio de estudio se localiza en la región del Gran Mendoza, a 32° 40' de latitud sur y 68° 51' de longitud oeste, a una altitud de 827 metros sobre el nivel del mar, en el piedemonte de la Cordillera de los Andes. El clima de Mendoza es árido templado frío, con marcadas variaciones térmicas diarias y estacionales, clasificado como BWk según la clasificación de Köppen (Kottek et al., 2006). Según el índice de Lang, calculado como la razón entre la precipitación anual (220 mm) y la temperatura media anual (16,5°C), el valor obtenido es 13,3, lo que sitúa a Mendoza en la categoría árida (0-20) (Collado, 2017). Las amplias amplitudes térmicas de Mendoza se reflejan en sus temperaturas medias: enero, el mes más cálido, tiene una temperatura media de 25,3°C (máxima media de 30,1°C y mínima media de 18,4°C), mientras que julio, el mes más frío, presenta una temperatura media de 7,8°C (máxima media de 14,7°C y mínima media de 3,4°C) (Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

Se utilizan datos meteorológicos del año típico, con registros de al menos 10 años. La estación meteorológica más cercana es "El Plumerillo" en Mendoza. El período de corrida estudiado es anual.

2.2. Construcción del modelo

En el proceso de modelado energético, el modelo de construcción está conectado con los materiales en el software EnergyPlus y conectado a una zona térmica que tiene cuatro muros externos, techo y piso. Tanto la envolvente horizontal como la vertical sin ventana se consideran adiabáticas en función de analizar espacios interiores ubicados en edificios en altura. La única excepción es el muro expuesto al exterior que contiene la ventana. Dicho muro posee una construcción con los materiales típicamente utilizados en la zona en estudio.

En el caso del muro exterior, las capas están compuestas por un revoque con rugosidad rugosa, un espesor de 0,025 m, una conductividad térmica de 1,16 W/m°C, una densidad de 1800 kg/m³ y un calor específico de 1000 J/kg°C. A continuación, se encuentra una capa de ladrillo con rugosidad media, un espesor de 0,2 m, una conductividad térmica de 0,81 W/m°C, una densidad de 1600 kg/m³ y un calor específico de 835 J/kg°C, seguido por otro revoque similar al anterior. Finalmente, el muro se completa con una capa de yeso, cuya rugosidad es suave, con un espesor de 0,02 m, una conductividad térmica de 0,4 W/m°C, una densidad de 800 kg/m³ y un calor específico de 840 J/kg°C.

En cuanto al piso, las capas incluyen un contrapiso y una carpeta, ambos con rugosidad rugosa, un espesor de 0,12 m, una conductividad térmica de 0,78 W/m°C, una densidad de 1600 kg/m³ y un calor específico de 780 J/kg°C. Para la cubierta, se utiliza una membrana cuya resistencia térmica es de 0,55 m²K/W. Esta se complementa con una carpeta similar a la del piso, y con una capa de lana mineral, que tiene una rugosidad

media, un espesor de 0,05 m, una conductividad térmica de 0,031 W/m°C, una densidad de 50 kg/m³ y un calor específico de 750 J/kg°C. Finalmente, la cubierta se completa con una capa de machimbre, también con rugosidad media un espesor de 0,25 m, una conductividad térmica de 0,11 W/m°C, una densidad de 600 kg/m³ y un calor específico de 1380 J/kg°C.

El vidrio es simple con un espesor de 3 mm. Si bien este estudio no analiza la materialidad de las protecciones solares, sino que realiza un análisis geométrico del sistema, se prevé para las mismas el uso de materiales livianos con un espesor de 10 mm.

Los valores de termostatos se seleccionaron de acuerdo a lo establecido por el Estándar ASHRAE 55: 21°C para invierno y 26°C para verano; el cual considera en las personas el uso de ropa típica propia para cada estación (0,9 clo y 0,5 clo respectivamente) durante actividad sedentaria (ASHRAE, 2009).

Para las demandas de iluminación se consideró un *setpoint* de 500 lux en un punto central, a 0,80 m del piso con un esquema de uso diurno con 4 W/m² y en base a un horario de encendido de 08:00 h a 23:00 h. No se consideran ganancias internas de equipos o personas. La tasa de infiltraciones se supone constante con un valor de 1 renovación por hora (1rph).

A continuación, se presentan todas las variables de entrada (o inputs) consideradas paramétricas, es decir que no resultan fijas para todos los escenarios de estudio:

El WWR (relación de ventana a pared) es el porcentaje del área de acristalamiento con respecto al área de la pared de la fachada de un edificio. El WWR se mide en una escala del 0% al 100% o del factor 0-1 para ventanas completas o sin ventanas, respectivamente.

Para este estudio se consideró WWR entre 30% (no se consideraron valores menores dado que no permitirían conocer el desempeño de la protección solar) y 90%. El valor del intervalo es del 10%.

Para la orientación se propusieron escenarios basados en las orientaciones que reciben radiación solar (este-norte - oeste). En consecuencia, cuenta con tres ángulos marcados 0° para el norte, 90° y -90° para el este y el oeste, pasando por ambas situaciones intermedias: +45° para noreste y -45° para noroeste.

El sistema de protección solar a estudiar consiste en un dispositivo modular de parasoles verticales y horizontales, cuyas lamas están separadas equidistantemente y se mantienen en una posición fija a lo largo del año.

Se proponen dos escenarios posibles con respecto al eje de la protección solar. Uno con las lamas dispuestas de forma horizontal (valor asignado al software: 0) y uno de lamas verticales (valor asignado al software: 1).

Para analizar la incidencia solar, se emplea el ángulo solar correspondiente a las 12:00 hora solar del 21 de

diciembre, con el objetivo de determinar la máxima altura solar y, por ende, el mínimo requerimiento de profundidad de la protección. En la localidad de Mendoza, este ángulo solar se establece en 82°. Con base en este valor y considerando la situación más desfavorable, es decir, una abertura con un WWR (proporción de superficie acristalada) del 90%, se calcula una profundidad de protección de 0,35 m. Esta profundidad se incrementa en 0,10 m en las propuestas siguientes, alcanzando hasta 0,55 m. En consecuencia, para el espaciado se toman los valores establecidos en la profundidad.

En cuanto al valor del ángulo de inclinación, para las lamas se estudia la propuesta de 0°, es decir que el dispositivo se encuentra en posición horizontal, luego para una inclinación de 15° y posteriormente de 30°, para obtener mayor bloqueo de la radiación solar. Los intervalos propuestos en todas las variables fueron seleccionados en función de observar modificaciones interesantes y proporcionales al espacio.

Se proponen tres escenarios posibles de distancia de la protección solar con respecto a la ventana. El primero corresponde a una situación donde el dispositivo está junto a al vidrio, es decir que el valor de la distancia de es 0,00 m. El segundo caso, respetando la proporción de profundidad y espaciado, resulta una situación intermedia donde el dispositivo está alejado a una distancia de 0,10 m del vidrio. El tercer escenario corresponde a la situación donde la protección está lo más alejada posible del vidrio, es decir 0,20 m.

Una vez configurado el modelo, se lleva a cabo el proceso de simulación energética y paramétrica. La Figura 2 muestra el lienzo de trabajo de la interfaz de Grasshopper con sus componentes, proporcionando una representación visual del flujo de trabajo paramétrico. Los nodos están organizados en secciones delimitadas por líneas punteadas, cada una cumpliendo una función específica en la modelización. La sección "Box" establece las características geométricas de la construcción, mientras que "Materiales" se vincula con "Construcción", definiendo las propiedades termo-físicas de los elementos constructivos. La sección "Protección Solar" parametriza las variables de los dispositivos de control solar. "Programa" configura las condiciones operativas del edificio, estableciendo los setpoints y enviando estos datos a "Simulación Energética", donde se integran los parámetros de las demás secciones para evaluar el desempeño energético. Las variables de salida de esta sección se enlazan con "Simulación Paramétrica", donde, junto con las diferentes configuraciones de "Protección Solar", se procesan los resultados del análisis energético y se optimizan las soluciones de diseño mediante técnicas de exploración de alternativas eficientes. A través del plug-in Wallacei, que integra el algoritmo NSGA-II, se identifican las soluciones de diseño más óptimas. Este método permite generar un diagrama conocido como frontera de Pareto, que facilita la visualización y selección de soluciones óptimas no dominadas en problemas de optimización multiobjetivo. Las soluciones no dominadas representan el mejor equilibrio posible entre criterios, donde mejorar uno implica empeorar otro. Los datos se procesaron y analizaron utilizando Wallacei Analytics y Python.

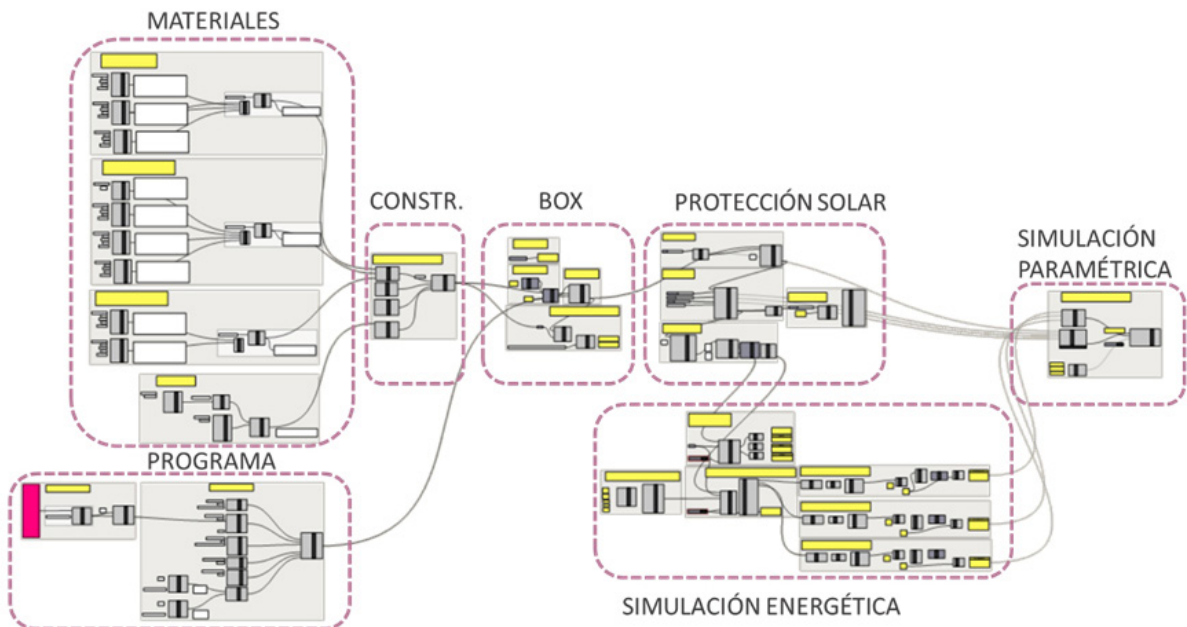


Figura 2: Linezo de Grasshopper para modelado paramétrico. (2024)

Posteriormente, se incorpora el agrupamiento por clustering en el proceso de optimización. En este contexto, el clustering organiza las soluciones en grupos manejables, lo que mejora la comprensión de sus relaciones y características comunes. El algoritmo K-means, implementado en Wallacei, segmenta las soluciones de la frontera de Pareto en un número específico de grupos, facilitando la identificación de patrones.

3. Resultados

Durante la ejecución del algoritmo NSGA-II, la interfaz de Wallacei permite visualizar en tiempo real los gráficos de desviación estándar, lo que facilita el monitoreo del proceso de selección. Al finalizar la simulación, estos gráficos reflejan la variabilidad en los requerimientos energéticos para refrigeración (FO1), calefacción (FO2) e iluminación (FO3). Esto se puede visualizar en la Figura 3.

Los resultados indican que las curvas más pronunciadas representan soluciones de menor calidad, mientras que las curvas más planas sugieren opciones más eficientes. Los gráficos también muestran la evolución de las simulaciones desde el inicio hasta el final, utilizando una escala cromática que varía del rojo (simulaciones iniciales) al azul (simulaciones finales). El proceso de optimización alcanzó un punto de convergencia efectivo, indicando que las soluciones generadas eran suficientemente óptimas y consistentes, con baja variabilidad. En la etapa final del gráfico, los objetivos de minimizar los requerimientos energéticos de refrigeración, calefacción e iluminación mostraron una tendencia descendente, lo que refleja mejoras en la calidad de las soluciones a medida que avanzaba la optimización.

Los resultados obtenidos a través del visualizador Wallacei X Analytics (Figura 3) permiten examinar exhaustivamente todos los escenarios posibles. Los datos de demanda energética para refrigeración revelan un rango que varía desde un mínimo de 20,37 kWh/m² año hasta un máximo de 116,53 kWh/m² año, lo que representa una disminución significativa de 96,16 kWh/m² año, equivalente al 82% al comparar los valores extremos. En cuanto a los requerimientos de calefacción, los valores oscilan entre un mínimo de 3,06 kWh/m² año y un máximo de 32,72 kWh/m² año, lo que sugiere una posible reducción de 29,66 kWh/m² año, es decir, un 90%. Respecto a la demanda de iluminación, se observa un rango de 13,24 kWh/m² año a 20,1 kWh/m² año, indicando una reducción potencial de 6,86 kWh/m² año, lo que representa una disminución del 21%.

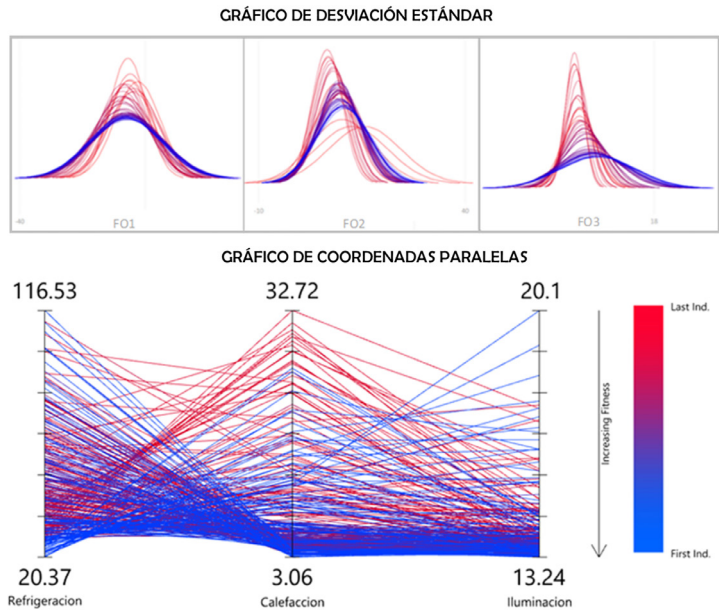


Figura 3: Arriba: Desviación Estándar durante el proceso de simulación con Wallacei. Abajo: Gráfico de coordenadas paralelas de las tres variables de estudio. (2024)

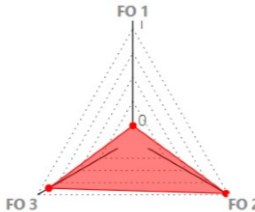
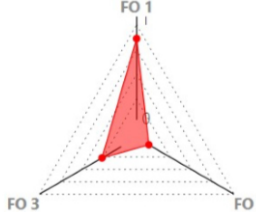
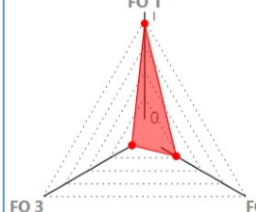
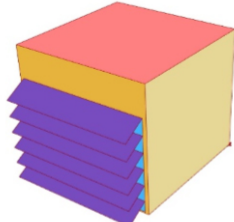
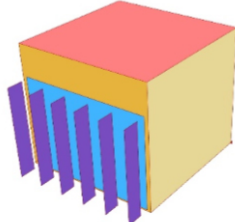
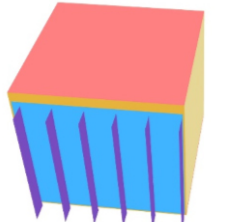
Gen.42 Ind.4 REFRIGERACIÓN	Gen.35 Ind.2 CALEFACCIÓN	Gen.17 Ind.2 ILUMINACIÓN
DEMANDA ENERGÉTICA	DEMANDA ENERGÉTICA	DEMANDA ENERGÉTICA
•FO1 REFRIGERACIÓN Valor :20.37 (kWh/m² año) Ranking:0/2499 •FO2 CALEFACCIÓN Valor: 23.04 (kWh/m² año) Ranking: 2428/2499 •FO3 ILUMINACIÓN Valor :16.24 (kWh/m² año) Ranking:2155/2499	•FO1 REFRIGERACIÓN Valor :79.36 (kWh/m² año) Ranking:2147/2499 •FO2 CALEFACCIÓN Valor :3.06 (kWh/m² año) Ranking: 0/2499 •FO3 ILUMINACIÓN Valor :13.42 (kWh/m² año) Ranking:658/2499	•FO1 REFRIGERACIÓN Valor :111.86 (kWh/m² año) Ranking:2420/2499 FO2 CALEFACCIÓN Valor :4.08 (kWh/m² año) •Ranking: 532/2499 •FO3 ILUMINACIÓN Valor :13.24 (kWh/m² año) Ranking: 0/2499
		
CARACTERÍSTICAS	CARACTERÍSTICAS	CARACTERÍSTICAS
WWR0.7	WWR0.7	WWR0.9
Orientación0	Orientación0	Orientación45
Eje0	Eje1	Eje1
Profundidad0.55	Profundidad0.35	Profundidad0.35
Espaciado0.35	Espaciado0.55	Espaciado0.55
Ángulo30	Ángulo0	Ángulo0
Distancia0	Distancia0.2	Distancia0.1
		

Figura 4: Mejores casos por objetivo. (2024)

El rango reducido de valores en la demanda de calefacción se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades adiabáticas de los muros, los cuales limitan significativamente el intercambio de energía con el entorno exterior. Esta característica disminuye la pérdida de calor durante los periodos de bajas temperaturas, contribuyendo a una notable reducción en los requerimientos de calefacción. Además, la elevada incidencia de radiación solar en la ubicación del estudio juega un papel crucial al aumentar la temperatura interna de los espacios, disminuyendo así la necesidad de sistemas de calefacción para mantener condiciones de confort térmico. Este efecto se amplifica en edificaciones con una alta relación de ventana a pared (WWR), ya que las ventanas permiten una mayor entrada de radiación solar directa, lo cual contribuye adicionalmente a la reducción de la demanda de calefacción.

3.1. Resultados optimizados por objetivo

El análisis de los casos más exitosos en términos de demanda energética revela una interacción compleja entre los requerimientos de refrigeración, calefacción e iluminación. Esta complejidad se ilustra en la Figura 4.

Enfocándose en la refrigeración, se destaca un caso con un mínimo de 20,37 kWh/m² año, situándose en el primer lugar del ranking (0/2499), lo que demuestra una gestión eficiente en este aspecto. Sin embargo, este logro se ve contrarrestado por altos valores en otros objetivos energéticos. Específicamente, la calefacción presenta un valor de 23,04 kWh/m² año, ubicándose en el puesto 2428/2499, y la iluminación muestra un consumo de 16,24 kWh/m² año, situándose en el puesto 2155/2499. Esto indica que la eficiencia en refrigeración puede comprometer la eficiencia en calefacción e iluminación.

Un patrón similar se observa al optimizar la calefacción. Se destaca un caso con un mínimo de 3,06 kWh/m² año, logrando un alto rendimiento en este objetivo. Sin embargo, la refrigeración se descompensa significativamente, ubicándose en el puesto 2147/2499 con un valor de 79,36 kWh/m² año. La iluminación, aunque no tan alta en el ranking, presenta una demanda de 13,42 kWh/m² año, ocupando el puesto 658/2499. Este caso subraya cómo la optimización de la calefacción puede llevar a un aumento considerable en la demanda de refrigeración.

Al optimizar la iluminación, se identifica un caso destacado con un mínimo de 13,24 kWh/m² año. La calefacción, en este escenario, no es tan alta con 4,08 kWh/m² año, ubicándose en el puesto 532/2499. Sin embargo, la eficiencia en refrigeración se ve seriamente comprometida, alcanzando un valor de 111,86 kWh/m² año, lo que lo sitúa en el puesto 2420/2499. Este patrón indica que la búsqueda de eficiencia en iluminación puede tener un impacto negativo significativo en la demanda de refrigeración.

El análisis de los parámetros arquitectónicos revela que los casos más exitosos presentan altos valores de WWR (relación de área de ventana a pared) para los tres tipos de requerimientos energéticos en estudio. Refrigeración y calefacción tienen un valor de WWR de 0,7, mientras que la iluminación muestra un valor aún más alto de 0,9. Las demandas de refrigeración y calefacción comparten la misma orientación (norte), lo que sugiere una estrategia común en términos de exposición solar. Sin embargo, el diseño de los parasoles difiere: los parasoles horizontales resultan más adecuados en función de reducir demandas para refrigeración y los verticales son más eficientes para disminuir demandas de calefacción. Esto indica que la optimización de la refrigeración busca una sombra marcada, mientras que la calefacción busca maximizar las ganancias solares. En el caso de la iluminación, la orientación noreste sugiere una estrategia para maximizar la ganancia solar en las mañanas, reduciendo así la necesidad de iluminación artificial durante las primeras horas del día.

Respecto al resto de los parámetros (profundidad, espaciado, ángulo y distancia) del sistema de parasoles, se observa que los valores máximos de estos parámetros en refrigeración son opuestos a los de calefacción e iluminación, reforzando la idea de que la optimización de la refrigeración tiende a buscar una sombra marcada, mientras que la calefacción busca ganancias solares.

Este análisis resalta la complejidad del conflicto de objetivos en la gestión energética de edificaciones. La optimización de un objetivo específico, como la refrigeración, calefacción o iluminación, puede entrar en conflicto directo con otros aspectos de la demanda energética.

3.2. Exploración de soluciones

Las simulaciones energéticas realizadas durante la optimización identificaron el frente de Pareto óptimo, donde la mejora de una función objetivo implica necesariamente el deterioro de otra, destacando la naturaleza no dominante de las soluciones en la optimización multicriterio.

La Figura 5 presenta un gráfico de dispersión tridimensional que representa el espacio de búsqueda, conocido también como el espacio de soluciones. En este espacio, cada eje tridimensional corresponde a una función objetivo específica: el eje X (FO1) se asocia con los requerimientos energéticos para refrigeración (kWh/m² año), el eje Y (FO2) con los requerimientos energéticos para calefacción (kWh/m² año), y el eje Z (FO3) con los requerimientos energéticos para iluminación (kWh/m² año). Es fundamental señalar que cada punto en los diagramas tridimensionales representa una solución alternativa generada durante el proceso de optimización. Los puntos en gris indican soluciones dominadas, donde al menos un objetivo supera a los demás. Por el contrario, los triángulos negros representan las soluciones de Pareto, o soluciones "no dominadas", en las cuales ningún

objetivo prevalece sobre los otros, reflejando así la diversidad y complejidad inherente a las soluciones. La Figura 6 presenta los diagramas de comparación entre los resultados totales y los obtenidos de la pared de Pareto.

Al analizar el consumo de refrigeración, se observó que las soluciones dominadas se concentran mayormente en un intervalo de la caja que va desde 32,1 hasta 61,2 kWh/m² año, con una mediana de 42,9 kWh/m² año y una media de 48,5 kWh/m² año. En contraste, las soluciones de Pareto exhibieron un intervalo de la caja que oscila entre 25,4 y 58 kWh/m² año, presentando una mediana de 34,9 kWh/m² año y una media de 45,3 kWh/m² año.

Respecto al análisis de la calefacción, se identificó que el rango de la caja para las soluciones dominantes se encuentra entre 4,5 y 11 kWh/m² año, con una mediana de 6 kWh/m² año y una media de 9 kWh/m² año. En comparación, las soluciones óptimas se distribuyen principalmente en un rango de la caja que va desde 3,6 hasta 12,4 kWh/m² año, presentando una mediana de 6,5 kWh/m² año y una media de 8,7 kWh/m² año.

En relación con los consumos de iluminación, las soluciones dominantes se distribuyen mayormente en el intervalo de 13,2 a 14 kWh/m² año, con una mediana de 13,6 kWh/m² año y una media de 13,9 kWh/m² año. Por otro lado, las soluciones óptimas muestran una distribución principal entre 13,3 y 14,5 kWh/m² año, con una mediana de 13,5 kWh/m² año y una media de 14,3 kWh/m² año.

Un punto importante a resaltar es que hay valores atípicos en las soluciones dominadas, especialmente superando el límite superior del diagrama de caja. Esto sugiere una mayor variabilidad en la distribución de estos datos y una distribución más dispersa en comparación con las soluciones de Pareto, donde no se encontraron valores inusuales.

En definitiva, el análisis detallado revela que las soluciones de Pareto exhiben un rendimiento superior en los tres objetivos de optimización estudiados, caracterizado por una distribución más consistente y la ausencia de valores atípicos. Esta mejora significativa en el rendimiento sugiere que las soluciones de Pareto pueden considerarse como una opción más eficiente y efectiva en términos de optimización en comparación con las soluciones dominantes.

3.3. Propuestas de diseño

Al emplear el algoritmo K-means con K=10, las soluciones del frente de Pareto se agrupan en 10 clústeres distintos, cada uno con características y similitudes específicas. Cada clúster representa un grupo de soluciones con atributos comunes, lo que facilita el análisis conjunto para comprender mejor las variaciones y tendencias entre las soluciones generadas durante el proceso de optimización.

Las diez propuestas de diseño finales se muestran en la Figura 7, 8 y 9. Estos casos presentan una diversidad significativa de características, proporcionando a los

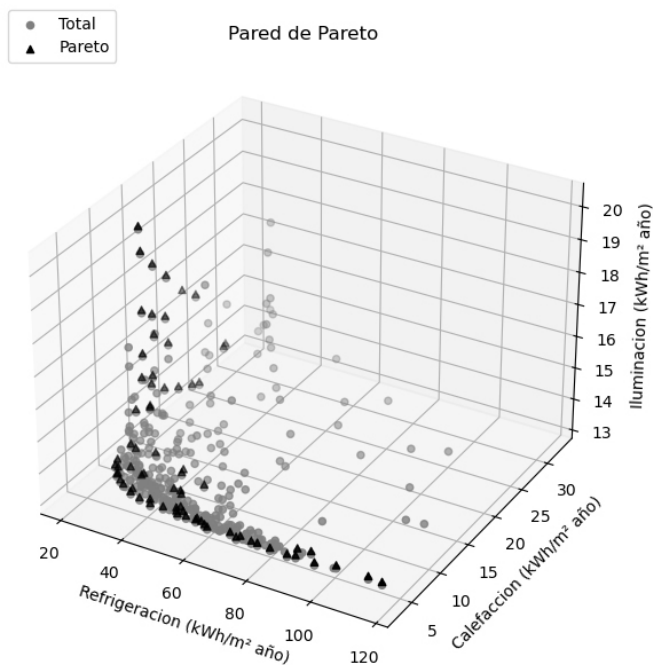


Figura 5: Gráfico de pared de Pareto. (2024)

profesionales una amplia gama de alternativas para adaptar las soluciones a distintos requerimientos y criterios específicos de diseño.

En relación con la proporción WWR, se observa una diversidad de propuestas que abarcan desde el mínimo propuesto -que es del 30%- hasta el máximo propuesto, alcanzando el 90%. Esta variedad en los valores de WWR otorga flexibilidad al diseñador para elegir la proporción que mejor se adapte a los objetivos energéticos y estéticos del proyecto.

En términos de orientación, destaca que sólo uno de los casos presenta una variación significativa con una orientación de 45°. Esto sugiere que la orientación de la edificación es un factor crucial en la búsqueda de una mayor eficiencia energética. La predominancia de orientación norte resalta la importancia de este aspecto en el diseño eficiente.

Al analizar el eje de las protecciones solares, la mayoría de los resultados muestran configuraciones horizontales. No obstante, tres propuestas optan por lamas verticales orientadas hacia el norte, las cuales han demostrado un buen rendimiento energético. Esto indica que, dependiendo de la orientación y el diseño específico, las protecciones verticales pueden ser una opción viable y eficiente.

En cuanto a los parámetros de profundidad y espaciado, los resultados son muy diversos, mostrando una amplia gama de combinaciones. Esta diversidad sugiere que estas variables son altamente versátiles y permiten una gran flexibilidad en el diseño, permitiendo experimentar con diferentes configuraciones para encontrar la óptima que satisfaga las necesidades funcionales y estéticas del proyecto.

En relación al ángulo de inclinación de las protecciones solares, se ha observado que un ángulo de 15° no parece ser una opción intermedia eficiente. La mayoría de los casos relevantes presentan ángulos de 30° o se mantienen en un ángulo de 0°, lo que sugiere que estos ángulos son más efectivos en términos de rendimiento energético.

En términos de la distancia de las protecciones solares respecto a la abertura, se ha observado que colocarlas directamente adyacentes a la abertura (0 m de distancia) brinda el mayor beneficio. A pesar de esto, también se han evaluado opciones con distancias de 0,1 y 0,2 metros, lo cual puede ser pertinente para abordar diversas premisas de diseño o retos técnicos relacionados con la instalación de la estructura. Esta flexibilidad en la distancia ofrece la posibilidad de ajustar el diseño según las condiciones y limitaciones específicas del proyecto.

4. Discusión y conclusiones

La optimización multicriterio, aplicada en este estudio mediante el algoritmo NSGA II y la interfaz Wallacei, desvela aspectos fundamentales al explorar las complejas interrelaciones entre objetivos aparentemente opuestos, como la minimización de los requerimientos energéticos para refrigeración, calefacción e iluminación.

Durante la ejecución del algoritmo NSGA II, el uso de la interfaz Wallacei permitió la visualización en tiempo real de los gráficos de desviación estándar, facilitando el monitoreo del proceso de selección. Los resultados mostraron las poblaciones correspondientes a los requerimientos energéticos de refrigeración, calefacción e iluminación.

El gráfico de desviación estándar demostró que, tras una búsqueda inicial extensa, se alcanzó un buen límite de convergencia, indicando que el algoritmo generó soluciones consistentes y de alta calidad. Los objetivos de minimización de requerimientos energéticos mostraron una tendencia a la baja en la etapa final, indicando mejoras en las soluciones.

En términos de demanda energética, resulta relevante observar que, entre el conjunto de soluciones, tanto el caso de máximo como el de mínimo requerimiento de cada objetivo pueden lograr reducciones significativas: un 82% en refrigeración, un 90% en calefacción y un 21% en iluminación.

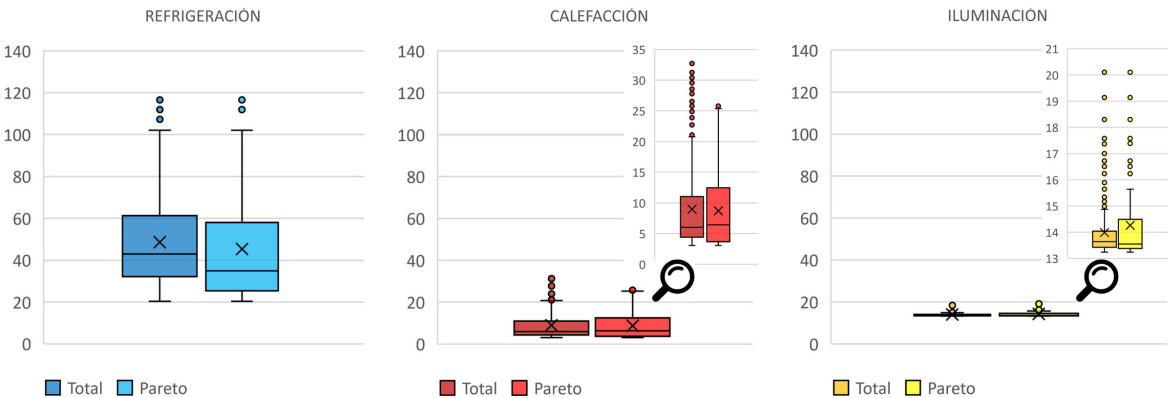
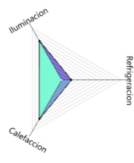
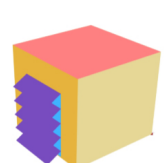
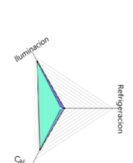


Figura 6: Gráfico comparación de población versus pareto para las tres variables de estudio. (2024)

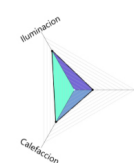
	Gen. 2 Ind. 26
WWR (%)	0.4
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.45
Espaciado (m)	0.45
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	22.75
Calefacción (kWh/m² año)	14.37
Iluminación (kWh/m² año)	14.82



	Gen. 10 Ind. 1
WWR (%)	0.4
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.55
Espaciado (m)	0.45
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	21.69
Calefacción (kWh/m² año)	15.24
Iluminación (kWh/m² año)	16.85



	Gen. 8 Ind. 5
WWR (%)	0.4
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.45
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	25.84
Calefacción (kWh/m² año)	10.34
Iluminación (kWh/m² año)	14.74



	Gen. 14 Ind. 5
WWR (%)	0.7
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.45
Espaciado (m)	0.45
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	26.44
Calefacción (kWh/m² año)	19.2
Iluminación (kWh/m² año)	14.14

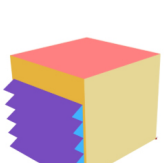
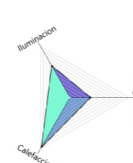
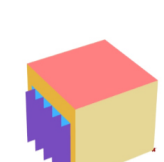


Figura 7: Casos representativos (2024)

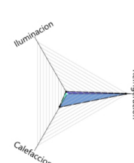
	Gen. 29 Ind. 44
WWR (%)	0.6
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	1
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.55
Ángulo (°)	0
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	58.81
Calefacción (kWh/m² año)	3.55
Iluminación (kWh/m² año)	13.42



	Gen. 29 Ind. 44
WWR (%)	0.6
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	1
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.55
Ángulo (°)	0
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	58.81
Calefacción (kWh/m² año)	3.55
Iluminación (kWh/m² año)	13.42



	Gen. 17 Ind. 2
WWR (%)	0.9
Orientación (°)	45
Eje (H/V)	1
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.55
Ángulo (°)	0
Distancia (m)	0.1
Refrigeración (kWh/m² año)	111.86
Calefacción (kWh/m² año)	4.08
Iluminación (kWh/m² año)	13.24



	Gen. 32 Ind. 30
WWR (%)	0.8
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	1
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.55
Ángulo (°)	0
Distancia (m)	0.2
Refrigeración (kWh/m² año)	88.49
Calefacción (kWh/m² año)	3.15
Iluminación (kWh/m² año)	13.35

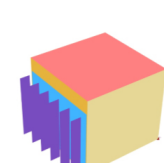
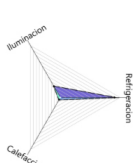
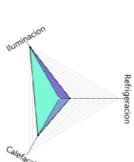


Figura 8: Casos representativos (2024)

	Gen. 43 Ind. 6
WWR (%)	0.3
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.55
Espaciado (m)	0.35
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	23.03
Calefacción (kWh/m² año)	13.02
Iluminación (kWh/m² año)	19.14



	Gen. 48 Ind. 25
WWR (%)	0.6
Orientación (°)	0
Eje (H/V)	0
Profundidad (m)	0.35
Espaciado (m)	0.55
Ángulo (°)	30
Distancia (m)	0
Refrigeración (kWh/m² año)	34.54
Calefacción (kWh/m² año)	6.85
Iluminación (kWh/m² año)	13.51

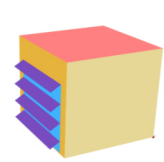
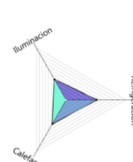


Figura 9: Casos representativos. (2024)

La exploración de soluciones mediante el frente óptimo de Pareto mostró que no es posible maximizar o minimizar simultáneamente todas las funciones objetivo sin comprometer al menos una de ellas. Las soluciones de Pareto exhibieron un rendimiento superior y una distribución más consistente en comparación con las soluciones dominadas.

El uso del *clustering* permitió agrupar las soluciones en conjuntos más coherentes, facilitando su análisis y evaluación. Los casos representativos de cada clúster presentaron una variedad de características, proporcionando flexibilidad y opciones para los profesionales en términos de proporción WWR, orientación y diseño de protecciones solares fijas.

Los valores de las 10 propuestas de diseño destacan ideas importantes: la relación ventana/pared (WWR) no es una restricción fija; una ventana más pequeña ofrece mayor control sobre la radiación, pero con un diseño adecuado del dispositivo de protección solar, una ventana más grande puede ser igualmente eficiente. En cuanto a la orientación, se confirma su carácter más inflexible, sin margen para variaciones, lo que la posiciona como una condición prioritaria en la búsqueda de eficiencia energética en edificaciones.

El estudio resalta la complejidad de la optimización multiobjetivo en la gestión energética de edificaciones, donde la mejora de un objetivo específico puede entrar en conflicto con otros, lo que hace esencial encontrar un equilibrio adecuado para lograr un rendimiento energético eficiente.

El análisis y filtración de datos en el proceso de evaluación no solo mejoran la calidad de las decisiones, sino que también conducen a una comprensión más profunda de las soluciones finales seleccionadas para cada caso. Este enfoque estratégico garantiza resultados alineados con los objetivos específicos y contribuye de manera significativa a la optimización del diseño arquitectónico.

Conflicto de intereses. Las autoras declaran no tener conflictos de intereses.

© **Derechos de autor:** Alicia Betman, Julieta Balter y Carolina Ganem, 2025.

© **Derechos de autor de la edición:** *Estoa*, 2025.

5. Referencias bibliográficas

- ASHRAE. (2009). *Thermal environmental conditions for human occupancy (ASHRAE Standard 55)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc.
- Aydin, D., & Mihlayanlar, E. (2020). Un estudio de caso sobre el impacto de la envolvente del edificio en la eficiencia energética en edificios residenciales de gran altura. *Arquitectura Ingeniería Civil Medio Ambiente*, 13(1), 5–18.
- Cabré, M. F., Solman, S., & Núñez, M. (2016). Regional climate change scenarios over southern South America for future climate (2080–2099) using the MM5 model: Mean, interannual variability and uncertainties. *Atmósfera*, 29(1), 35–60. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.0104>
- Collado, A. (2017). Cambio Climático, Transformaciones y Conflictos Territoriales en la Cuenca Hídrica de “El Morro”, Provincia De San Luis, Argentina. *XVI Encuentro de Geógrafos de América Latina (EGAL 2017)*.
- Dabbagh, M., & Krarti, M. (2022). Experimental evaluation of the performance for switchable insulated shading systems. *Energy and Buildings*, 256, 111753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111753>
- Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético. (2019). Escenarios energéticos 2030. *Secretaría de Energía, Ministerio de Hacienda*. http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/planeamiento/2019-11-14_SsPESGE_Documento_Escenarios_Energeticos_2030_ed2019_pub.pdf
- Flores-Larsen, S., Filippín, C., & Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Ganem, C., Balter, J., & Alchapar, N. (2020). Impact of local urban climate on building energy performance: Case studies in Mendoza, Argentina. En *Urban microclimate modelling for comfort and energy studies*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_22
- Grynning, S., Lolli, N., Wågø, S., & Risholt, B. (2017). Solar shading in low energy office buildings: Design strategy and user perception. *Journal of Daylighting*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.15627/jd.20171>
- International Energy Agency (IEA). (2019). *Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. <https://www.iea.org/areas-of-work/promoting-energy-efficiency/global-alliance-for-building-and-construction>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Koçak, C., & Alaçam, S. (2023). Marco de diseño asistido por algoritmos para BIM: Luz natural en las primeras fases del diseño. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 12(24), 67–79. <https://doi.org/10.18537/est.v012.n024.a06>
- Krstić-Furundžić, A., Vujošević, M., & Petrovski, A. (2019). Energy and environmental performance of the office building facade scenarios. *Energy*, 183, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.231>
- Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Apriliyanti, S. R., Lubis, I. H., Atthailah, Hensen, J. L. M., & Paramita, B. (2021). Design optimisation of fixed and adaptive shading devices on four façade orientations of a high-rise office building in the tropics. *Buildings*, 12(1), 25. <https://doi.org/10.3390/buildings12010025>

- Naderi, E., Sajadi, B., Behabadi, M. A., & Naderi, E. (2020). Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran. *Building and Environment*, 169, 106570. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106570>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Estado del clima en Argentina 2022*. <https://www.argentina.gob.ar/smn>
- Touma, A. A., & Ouahrani, D. (2018). The selection of brise soleil shading optical properties for energy conservation and glare removal: A case study in Qatar. *Journal of Building Engineering*, 20(June), 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.08.020>
- Rabani, M., Bayera Madessa, H., & Nord, N. (2021). Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44(September 2020), 101020. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101020>
- Unión Europea. (2018). *Directiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Boletín Oficial del Estado*. www.boe.es
- Yong, S.-G., Kim, J.-H., Gim, Y., Kim, J., Cho, J., Hong, H., Baik, Y.-J., & Koo, J. (2017). Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization in US standard climate zones using experimental design. *Energy and Buildings*, 141, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.032>
- Zhao, J., & Du, Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office buildings in different climatic regions of China. *Solar Energy*, 206(September 2019), 997–1017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>