

ESTRATEGIAS INTEGRALES DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA Y SOCIAL EN EL MERCADO CENTRAL DE LIMA: BALANCE ENTRE COSTO Y SOSTENIBILIDAD

P. Aguilera Benito, K. Soto

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

Existe una necesidad urgente de implementar soluciones sostenibles en el sector de la construcción, especialmente en el contexto peruano, donde las regulaciones sobre eficiencia energética y rehabilitación de edificios aún se encuentran en fase de desarrollo.

Este estudio aborda la rehabilitación energética y social del Mercado Central de Lima, con el objetivo de identificar las intervenciones más eficaces desde el punto de vista energético y económico, al tiempo que se promueve la sostenibilidad urbana. Para ello, se llevó a cabo una evaluación detallada del estado original del edificio, que abarcó la envolvente térmica y los sistemas técnicos, seguida de cincuenta simulaciones energéticas utilizando el software Ce3X[®] v.2.3. Sobre la base de la calificación energética obtenida, se propusieron varias mejoras de la envolvente y los sistemas de climatización, que se evaluaron en términos de ahorro energético, rentabilidad y beneficios sociales.

La opción más ventajosa, la medida M9, combina intervenciones en tejados, aberturas e instalaciones. Alcanzó una calificación energética global de 17,6 A; con una vida útil prevista de 75 años y una inversión de 1 642 457,01 euros, recuperable en solo 1.4 años.

Los resultados ponen de relieve el potencial de las estrategias de rehabilitación integrada para mejorar simultáneamente el rendimiento energético y el impacto social. La medida M9 se perfila como la solución más viable, ya que proporciona un modelo replicable para la rehabilitación urbana sostenible en Perú y otras regiones que se enfrentan a retos similares.

PALABRAS CLAVE: rehabilitación energética, sostenibilidad urbana, eficiencia energética, simulación energética, impacto social.

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad en la construcción es una prioridad global orientada a reducir impactos ambientales, optimizar recursos y mejorar la calidad de vida mediante edificaciones eficientes y saludables [1]. No obstante, en los países en desarrollo, como es el caso de Perú, la rehabilitación energética enfrenta limitaciones regulatorias, técnicas y financieras que restringen su implementación, situación especialmente crítica en el patrimonio histórico peruano, caracterizado por deterioro, alto consumo energético y escasa intervención sostenible [2,3].

Dado que la mayor parte del impacto ambiental de los edificios ocurre durante su fase de uso, la rehabilitación energética de edificaciones existentes es clave, particularmente en patrimonio construido, donde debe equilibrarse la eficiencia energética con la conservación cultural mediante enfoques multidisciplinarios y evaluaciones de ciclo de vida [4-8].

En el sector comercial, el MINEM (2020) identifica a mercados y supermercados como edificaciones de alta demanda energética, principalmente por iluminación y climatización [9,10]. A nivel internacional, el sector retail presenta elevada intensidad energética y es estratégico para la reducción de emisiones, mientras que en Perú la limitada inversión en modernización mantiene altos consumos y evidencia la necesidad de nuevas estrategias de gestión energética [11-19,21].

Aunque la literatura recomienda rehabilitaciones integradas que combinen envolventes, sistemas y energías renovables por su mayor eficiencia y rentabilidad [15,16], existen pocos estudios que evalúen paquetes híbridos con análisis económico en mercados de países en desarrollo. Para cubrir este vacío, el estudio analiza la envolvente y los sistemas del edificio mediante simulaciones energéticas y evaluación económica, destacando la necesidad de modelos económicos más precisos [17,19].

La contribución de este artículo es triple: presenta la primera evaluación sistemática de paquetes híbridos de rehabilitación (cubiertas, aberturas e instalaciones) en un mercado peruano; integra simulaciones energéticas con análisis económico para identificar soluciones costo-efectivas y replicables en contextos con recursos limitados; e incorpora la dimensión social de la rehabilitación como la reutilización de cubiertas y espacios comunes resaltando el valor cultural y económico de la rehabilitación sostenible en centros históricos.

2. METODOLOGÍA

El modelado energético se basó en un análisis preliminar de la configuración espacial, estructural y arquitectónica del edificio, a partir de la cual se definieron los parámetros de entrada para la simulación y las condiciones del entorno.

2.1. Configuración arquitectónica

El Mercado Central de Lima, construido en 1967, se ubica en el distrito del Cercado de Lima, área de alto valor histórico, cultural y monumental. Este presenta una configuración mixta, con un volumen principal que ocupa toda la manzana y está rodeado por un anillo comercial perimetral. Dicho volumen se organiza en tres niveles, el primero subdividido en dos plataformas separadas por medio nivel y conectadas mediante rampas. Sobre el mercado se eleva una torre de oficinas de nueve pisos, apoyada en columnas que generan una planta libre (Figura 1a). En el interior, el mercado presenta una planta

libre organizada en torno a un vacío central de triple altura, que articula la circulación principal del conjunto y alberga las rampas de conexión entre niveles. Este espacio está cubierto por una estructura elevada de cubierta metálica, diferenciada de las cubiertas de concreto empleadas en el resto del edificio (Figura 1b).

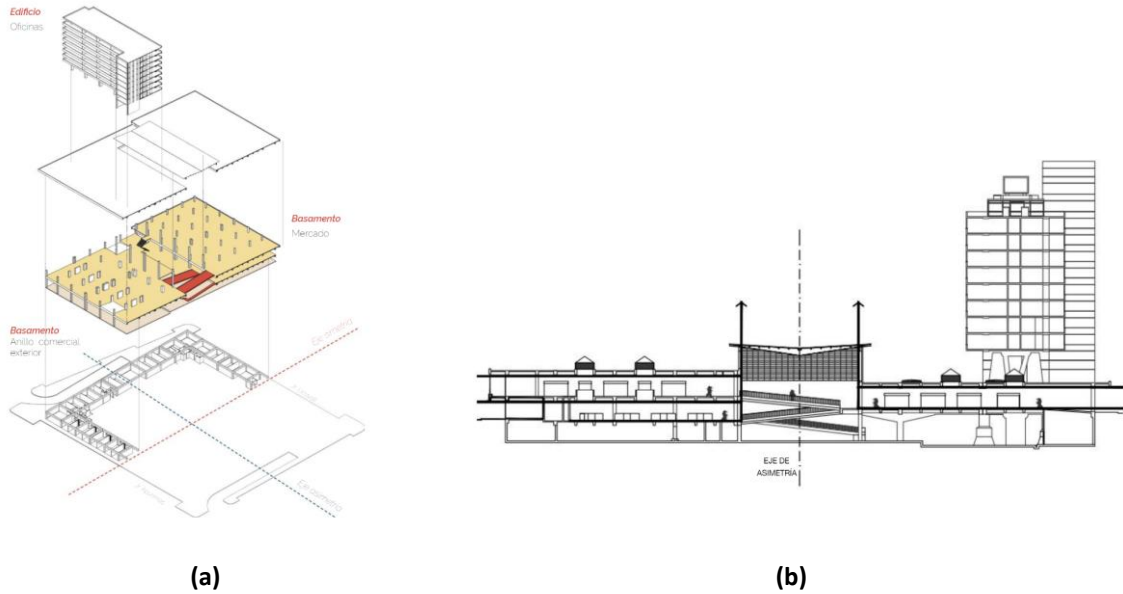


Figura 1. Imágenes del mercado central: **(a)** Isometría explotada del análisis formal del Mercado Central. **(b)** Sección del Mercado Central. Fuente: Tolentino, 2019 [25].

2.2. Análisis inicial del edificio

Esta sección describe las características constructivas de la envolvente del edificio y las instalaciones disponibles para realizar un análisis energético inicial (Tabla 1,2)

Tabla 1: Características de los cerramientos del mercado

Elementos	Nombre	Dimensiones	Superficie (m ²)	U (W/ m ² k)
Cubierta	Cubierta plana de mercado	variable	8745	4.23
	Cubierta inclinada de mercado	variable	1838	7.04
Muros Fachada noreste avenida Huallaga	F.M Huallaga primer nivel	variable	550.82	2.36
	F.M Huallaga espacio central	variable	517.80	4.00
	F.M Huallaga lucernarios	variable	69.3	5.88
	Muro en contacto con terreno Huallaga	variable	576.31	0.66
Muros Fachada noroeste	F.M Ayacucho primer nivel	variable	458.35	2.36
	F.M Ayacucho segundo nivel	variable	215.63	4.00

avenida Ayacucho – Muro en contacto con el terreno	F.M Ayacucho espacio central	variable	123.55	4.00
	F.M Ayacucho lucernarios	variable	69.3	5.88
	Muro en contacto con terreno Ayacucho	variable	410.53	0.85
Muros Fachada suroeste avenida Ucayali – Muro en contacto con el terreno	F.M Ucayali primer nivel	variable	288.19	2.36
	F.M Ucayali segundo nivel	variable	540.09	4.00
	F.M Ucayali espacio central	variable	338.44	4.00
	F.M Ucayali lucernarios	variable	69.3	5.88
	Muro en contacto con terreno Ucayali	variable	302.81	1.01
Muros Fachada sureste avenida Andahuaylas – Muro en contacto con el terreno	F.M Andahuaylas primer nivel	variable	433.72	2.36
	F.M Andahuaylas segundo nivel	variable	215.63	4.00
	F.M Andahuaylas espacio central	variable	123.55	4.00
	F.M Andahuaylas lucernarios	variable	69.3	5.88
	Muro en contacto con terreno Andahuaylas	variable	410.53	0.85
Suelo	Suelo en contacto con terreno	variable	9523.8	1.00
	Suelo en contacto con el aire exterior	variable	1059	3.18

Tabla 2: Características de los cerramientos de la torre de oficinas

Elementos	Nombre	Dimensiones	Superficie (m ²)	U (W/ m ² k)
Cubierta plana oficinas	Cubierta plana oficinas	variable	1465	4.23
Muros: Fachada noreste avenida Huallaga	F.O Huallaga	variable	2501.14	4.0
Muros: Fachada noroeste avenida Ayacucho	F.O Ayacucho	variable	722.43	4.0
Muros: Fachada suroeste avenida Ucayali	F.O Ucayali	variable	2441.48	4.0
Muros: Fachada sureste avenida Andahuaylas	F.O Andahuaylas	variable	772.43	4.0

Las aberturas del edificio presentan propiedades térmicas diferenciadas según su tipología, definida por el tipo de cerramiento. Para su clasificación se establecieron las siguientes nomenclaturas: ROM (cierres enrollables), REM (celosías o lamas verticales fijas), HM (sin cerramiento definido), VO y VM (ventanas con cerramiento de vidrio), y MO Y MM (divisiones interiores acristaladas). Sus propiedades térmicas se consideran valores estimados.

El edificio tiene uso comercial, con alta intensidad de ocupación y un horario de funcionamiento de 12 horas diarias, parámetros fundamentales para definir su operación energética. Además, se identifican los equipos que influyen en el funcionamiento del edificio para su análisis energético.

2.3. Instrumentos para la evaluación de mejoras energéticas y económicas

Para evaluar las mejoras energéticas y económicas del edificio, se empleó principalmente el software Ce3X[®] que permitió obtener la calificación energética inicial y simular distintos escenarios de rehabilitación de la envolvente y los sistemas, incluyendo medidas individuales y combinadas, junto con su rentabilidad mediante el cálculo de periodos de retorno. Esta herramienta fue seleccionada por su aplicabilidad en contextos con información limitada y marcos normativos en desarrollo, como el peruano, aunque presenta limitaciones frente a herramientas de simulación dinámica más avanzadas.

El análisis se complementó con Sketchup[®] para el estudio de radiación solar, PVGIS[®] para estimar el potencial fotovoltaico según condiciones climáticas locales, y CYPE[®] para la estimación de costos. La integración secuencial de estas herramientas permitió realizar una evaluación técnico-económica integral de las estrategias de rehabilitación energética del edificio.

2.4. Datos climáticos

El distrito de Cercado de Lima presenta un clima desértico clasificado como E(d)B, con precipitaciones anuales muy bajas (aprox. 8 mm, principalmente en forma de garúa entre julio y septiembre) y temperaturas moderadas influenciadas por el mar, con máximas entre 18°C y 26,7°C y mínimas entre 13,5°C y 19°C [22]. La ciudad se sitúa a 101 m.s.n.m. y presenta alta humedad relativa promedio (81%), con valores entre 66% y 92% [20].

El estudio de asoleamiento del edificio, realizado mediante modelado 3D en Sketchup según su ubicación, evaluó equinoccios y solsticios. Se encontró que las fachadas noreste y sureste reciben más sol por la mañana, mientras que las noroeste y suroeste lo reciben por la tarde. Esto permite identificar las orientaciones más expuestas para aplicar estrategias pasivas y de protección solar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección evalúa las medidas de mejora energética mediante un análisis individual de su impacto en consumo, emisiones y demanda del edificio. Posteriormente, se combinan las medidas con mejor desempeño y se realiza un análisis económico y de periodo de retorno. El proceso permite determinar la solución más eficiente y viable desde el punto de vista técnico y económico.

3.1. Evaluación de medidas individuales de mejora con el software Ce3X[®]

En esta primera etapa se evalúan individualmente las medidas de mejora con el objetivo de determinar cuáles podrán implementarse finalmente en el proyecto. Se priorizan aquellas que presentan el mayor porcentaje de ahorro y mejor calificación respecto a la situación original del edificio.

En el caso de medidas sobre la envolvente térmica (cubiertas, fachadas y aberturas), el criterio principal de selección es el porcentaje de ahorro de demanda energética. Por el contrario, en las medidas relacionadas con las instalaciones, el factor determinante es el porcentaje de ahorro en consumo energética.

3.1.1. Medidas de mejora en cubierta

Se evaluaron ocho variantes de aislamiento en cubiertas, combinando XPS (40 y 80 mm) y PUR (30 y 80 mm) en cubiertas planas e inclinada, con acabado no transitable, transitable y vegetal.

Las medidas con mayor aislamiento térmico generan los mayores ahorros energéticos. En la cubierta plana, el XPS con acabado transitable y vegetación es la opción más eficiente, mientras que el aislamiento PUR en la cubierta inclinada no produce ahorro y empeora el desempeño del edificio.

Cuando se realiza el conjunto de las medidas con aislamiento térmico de XPS de espesor 80mm, la calificación y el ahorro en demanda empeoran respecto a la situación original, obteniendo -1.3%. Por lo que se realiza una prueba realizando un conjunto de medidas con aislamiento térmico de XPS de espesor 40mm (Tabla 3).

Tabla 3: Ahorro y calificación de medidas de mejora individuales en cubiertas

	Consumo	Emisiones	Demanda
Calificación original	487.5 E	129.4 E	78.5 D
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 40 mm en cubierta plana de mercado con acabado transitable y vegetal	Refrigeración: 1% Iluminación: -	Refrigeración: 1% Iluminación: -	Refrigeración: 1%
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 40 mm en cubierta plana de oficinas con acabado no transitable	486.23 E	486.23 E	77.63 E

En este caso, si se realiza el conjunto de las medidas de mejora en cubiertas que cuentan con un aislamiento térmico de 40mm, la calificación y el ahorro en cuanto a demanda mejora con un 1% respecto a la situación original. Esto quiere decir que para las condiciones climáticas en donde se encuentra el edificio, es preferible contar con medidas de mejora cuyo aislamiento sea de menos espesor debido a que cuando la temperatura aumenta, tener un material de aislamiento térmico con mayor espesor retiene más el calor dentro del edificio y por lo tanto ocasiona que se necesita más demanda de refrigeración.

3.1.2. Medidas de mejora en fachada

Los resultados con respecto a estas medidas de mejora demuestran que de manera individual las que más aportan son incorporar un aislamiento térmico de XPS por el interior de 60mm de espesor tanto para las fachadas noroeste y suroeste, que generan un ahorro en consumo, emisiones y demanda de 1.2% (Tabla 4).

Tabla 4: Ahorro y calificación de medidas de mejora individuales en fachadas

	Consumo	Emisiones	Demanda
Calificación original	487.5 E	129.4 E	78.5 D
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 60 mm por el interior de fachadas NO y SO (más radiación solar reciben)	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 486.03 E	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 128.99 E	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 77.5 D
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 20 mm por el interior de fachadas NO y SO (más radiación solar reciben)	Refrigeración: 1% Iluminación: - 486.32 E	Refrigeración: 1% Iluminación: - 129.07 E	Refrigeración: 1% Iluminación: - 77.7 D
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 60 mm por el interior de fachadas NE y SE (menos radiación solar reciben)	Refrigeración: 0.2% Iluminación: - 487.16 E	Refrigeración: 0.2% Iluminación: - 129.9 E	Refrigeración: 0.2% Iluminación: - 78.27 E
Incorporar aislamiento térmico de XPS de espesor 20 mm por el interior de fachadas NE y SE (menos radiación solar reciben)	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 487.22 E	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 129.3 E	Refrigeración: 1.2% Iluminación: - 78.32 E

3.1.3. Medidas de mejora en aberturas

Se evaluaron ocho variantes en huecos de la envolvente térmica combinando vidrio doble bajo emisivos (4-6-4 y 4-12-4) y marcos de PVC con tres cámaras de aire en diferentes orientaciones. Y por otro lado, la sustitución de lamas estáticas por lamas móviles.

Las medidas más eficaces son la sustitución de vidrios y marcos en las fachadas noroeste y suroeste por doble acristalamiento bajo emisivo con marcos de PVC, que genera un ahorro del 6.7%. En los lucernarios, el mayor beneficio se obtiene al reemplazarlos por vidrio doble bajo emisivo horizontal, con un ahorro del 2.6%. Asimismo, sustituir las lamas verticales estáticas por lamas móviles, especialmente en las fachadas noroeste y suroeste, produce el mayor impacto global, con un ahorro del 7.8% en consumo, emisiones y demanda.

Una vez elegidas las medidas que suponen más ahorro al edificio con respecto a las aberturas, se procede a realizar el conjunto de estas (Tabla 5).

Tabla 5: Ahorro y calificación de medidas de mejora individuales en aberturas

	Consumo	Emisiones	Demanda
Calificación original	487.5 E	129.4 E	78.5 D
Sustituir ventanas y mamparas por vidrios dobles bajos emisivos 4-12-4 y marcos PVC con tres cámaras de aire en fachadas NO, SO	Refrigeración: 17.4%	Refrigeración: 17.4%	Refrigeración: 17.4 %
Sustituir lucernarios por vidrios dobles bajos emisivos 4-6-4 y marcos PVC con tres cámaras de aire	Iluminación: - 467.45 E	Iluminación: - 124.06 E	64.79 C
Sustituir lamas estáticas por lamas móviles en fachadas NO, SO			

El conjunto de estas mejoras en aberturas se traduce en un ahorro en consumo, emisiones y demanda del 17,4%.

3.1.4. Medidas de mejora en instalaciones.

En este caso, se plantearon las siguientes medidas de mejora en instalaciones: incorporar equipos de aire acondicionado y de ventilación, sustituir las luminarias actuales por LED e incorporar paneles solares.

De forma individual, las medidas en instalaciones que generan mayor ahorro son incorporar un sistema de aire acondicionado eficiente, con un ahorro de 80.3% en refrigeración y 100% en iluminación; instalar paneles solares, con un 47.8% de ahorro en refrigeración y 100% en iluminación; y sustituir las luminarias por tecnología LED, con un 42.1% de ahorro en refrigeración y 88% en iluminación.

Una vez elegidas las medidas que suponen más ahorro al edificio con respecto a las instalaciones, se procede a realizar el conjunto de estas (Tabla 6).

Tabla 6: Ahorro y calificación de medidas de mejora individuales en instalaciones

	Consumo	Emisiones	Demanda
Calificación original	487.5 E	129.4 E	78.5 D
Incorporar equipo de aire acondicionado	Refrigeración: 78.1%	Refrigeración: 78.1%	Refrigeración: 42.1%
Sustituir luminarias actuales por luminarias LED	Iluminación: 88% 68.96 A	Iluminación: 88% 18.09 A	45.46 B
Incorporar paneles solares			

El conjunto de estas mejoras en instalaciones produce un ahorro en consumo y emisiones de refrigeración e iluminación de 78.1% y 88% respectivamente. Mientras que en demanda de refrigeración supone un ahorro de 42.1%.

3.2. Análisis de medidas de mejora combinada con el software Ce3X®

Se analizaron todas las combinaciones derivadas de los conjuntos previamente obtenidos para cada elemento de la envolvente térmica y las instalaciones, identificación aquellas que optimizan las reducciones de consumo, emisiones y demanda, junto con la calificación de la medida.

Este análisis demostró que pueden obtenerse once combinaciones posibles de todos los conjuntos de medidas de mejora, las cuales son M1, medidas de mejora en cubiertas y fachadas; M2, medidas de mejora en cubiertas y aberturas; M3, medidas de mejora en cubiertas e instalaciones; M4, medidas de mejora en fachadas y aberturas; M5, medidas de mejoras en fachadas e instalaciones; M6, medidas de mejora en aberturas e instalaciones; M7, medidas de mejora en cubiertas y fachadas; M8, medidas de mejora en cubiertas, fachadas e instalaciones; M10, medidas de mejora en fachadas, aberturas e instalaciones; M11, medidas de mejora en cubierta, fachada, aberturas e instalaciones.

A continuación, se presenta una tabla con las once medidas de mejora combinada propuestas, el porcentaje de ahorro en consumo, emisiones y demanda en comparación con la situación original y la nueva calificación que se obtendría tras aplicar cada medida promedio (Tabla 7) para su posterior análisis.

Tabla 7: Ahorro y calificación de las combinaciones de los conjuntos de medidas de mejora respecto a la situación original

	Consumo (%)	Emisiones (%)	Demanda (%)	Calificación energética (KgCO ₂ /m ²)
Calificación original	114.7	30.4	78.5	129.4
M1	-10.1	-10.1	-10.1	132.4
M2	2.8	2.8	2.8	128.5
M3	78.9	78.9	44.1	18.1
M4	18.8	18.8	18.8	123.6
M5	78.4	78.4	42.6	18.9
M6	82.4	82.4	36.5	17.6
M7	-6.8	-6.8	-6.8	131.4
M8	77	77	39.1	18.6
M9	80.5	80.5	48.4	17.6

M10	82.9	82.9	54.7	17.3
M11	78.9	78.9	44.2	18.1

Las medidas de mejora en la cubierta y la fachada, evaluadas de forma aislada o combinada, muestran que la combinación cubierta – fachada tiende a aumentar la demanda de refrigeración y a reducir su rendimiento energético global, con una variación negativa del -10.1% en la demanda de refrigeración y una calificación global que desciende a 132,4 E. Este resultado se explica por la tendencia del aire caliente a acumularse en el interior cuando se combina el aislamiento de la cubierta con el de la fachada, lo que incrementa la necesidad de refrigeración a pesar de ligeras reducciones individuales (1% en cubiertas). Por lo tanto, esta combinación no es favorable para la rehabilitación desde el punto de vista energético y debe evitarse o gestionarse con estrategias complementarias (Figura 2).

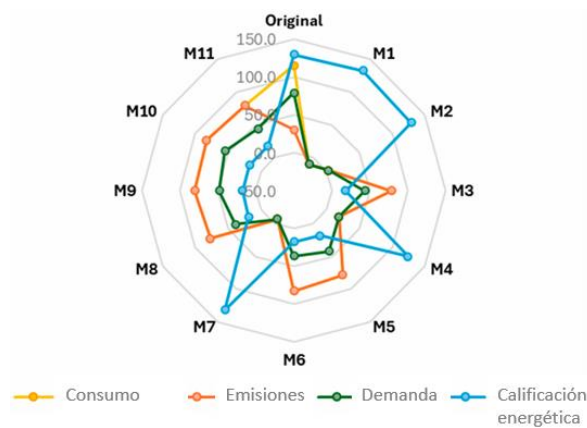


Figura 2. Gráfico radial del porcentaje de mejora en consumo, emisiones y demanda (%). Calificación energética (KgCO_2/m^2).

En contraste, las combinaciones que aplican mejoras en las aberturas y en las instalaciones (M6) o en las instalaciones junto con la envolvente térmica (M3, M5, M8, M9, M10 y M11) muestran mejoras significativas en la demanda de refrigeración y en el rendimiento global (respaldadas por calificaciones entre 17,3 A y 18,6 A).

En particular, la sinergia entre aberturas e instalaciones produce los mayores ahorros en refrigeración (53.5% en M6) y una notable disminución del consumo energético gracias a equipos HVAC eficientes, paneles solares y luminarias LED, lo que sugiere que las estrategias que priorizan las mejoras en las instalaciones y el control solar de las aberturas son las más eficaces para la rehabilitación energética.

3.3. Análisis económico y de amortización de las medidas combinadas

Se analizan los costos y el periodo de amortización de las combinaciones de medidas de rehabilitación para identificar las más viables, priorizando aquellas con rápida recuperación de la inversión. Dado que el edificio se ubica en Perú, los costos se calculan en moneda local y luego se convierten a euros, utilizando precios ajustado al contexto económico nacional. Finalmente, se comparan las once combinaciones según su vida útil, costo, amortización y nueva calificación energética (Tabla 8).

Tabla 8: Datos de la vida útil, coste y años de amortización de las combinaciones de conjuntos de medidas de mejora

	Vida útil (años)	Coste de implementación	Amortización (años)	Nueva calificación
M1	60	EUR 416,912.51	-12.9	132.4 E
M2	60	EUR 633,087.44	69.3	128.5 E
M3	50	EUR 1,383,089.79	1.2	18.1 A
M4	50	EUR 302,559.52	5	123.6 E
M5	40	EUR 1,052,261.88	0.9	18.9 A
M6	40	EUR 1,268,736.80	1.1	17.6 A
M7	85	EUR 676,279.74	-31.1	131.4 A
M8	75	EUR 1,426,282.09	1.2	18.6 A
M9	75	EUR 1,642,457.01	1.4	17.6 A
M10	65	EUR 1,311,929.10	1.1	17.3 A
M11	100	EUR 1,685,649.31	1.4	18.1 A

3.4. Comparación energética y económica entre el estado inicial y la solución adoptada

La rehabilitación energética del edificio genera una mejora sustancial en su desempeño ambiental, elevando su calificación de 129.4 kgCO₂/m² (E) a 17.6 kgCO₂/m² (A).

Debido a las condiciones climáticas, no se registran demandas significativas de calefacción ni de agua caliente sanitaria. Sin embargo; la intervención reduce de forma notable la demanda de refrigeración, que pasa de 78.5 a 40.5 kWh/m², junto con una fuerte disminución de sus emisiones, de 30.4 a 5.9 kgCO₂/m².

Asimismo, la modernización del sistema de iluminación reduce drásticamente sus emisiones, de 98.9 a 12.9 kgCO₂/m², evidenciando el impacto de la mejora de las instalaciones.

Las comparaciones detalladas entre el estado original y el rehabilitado de la envolvente y los sistemas se presentan en las figuras 3 y 4.

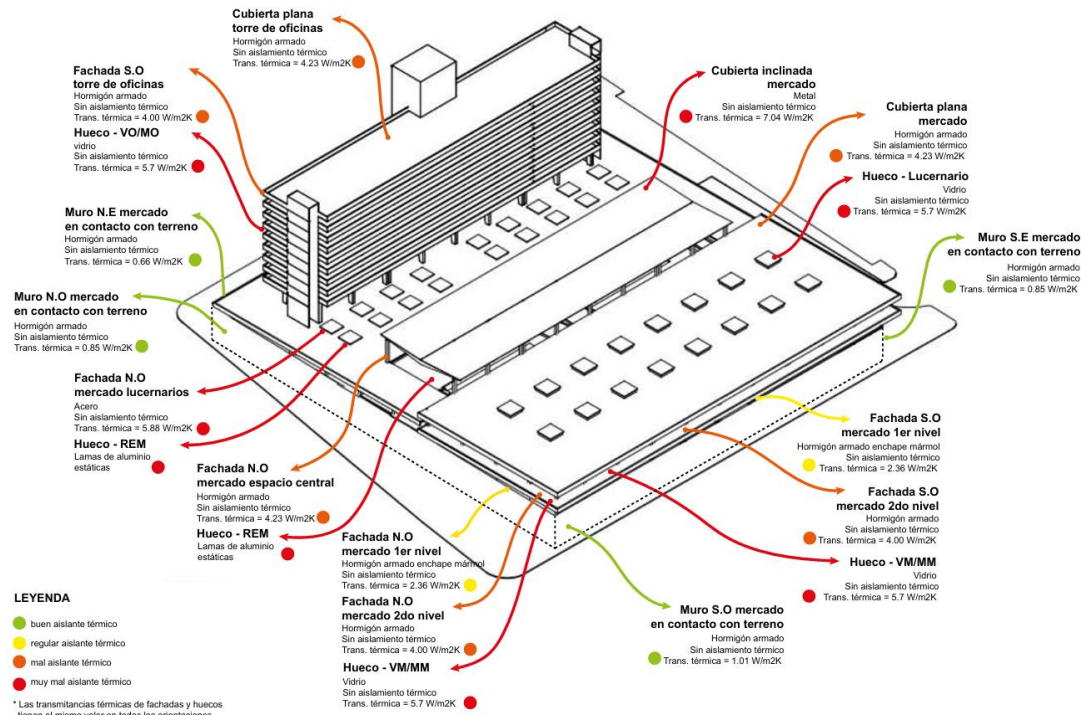


Figura 3. Isometría explicativa de la calificación energética del estado actual del edificio.

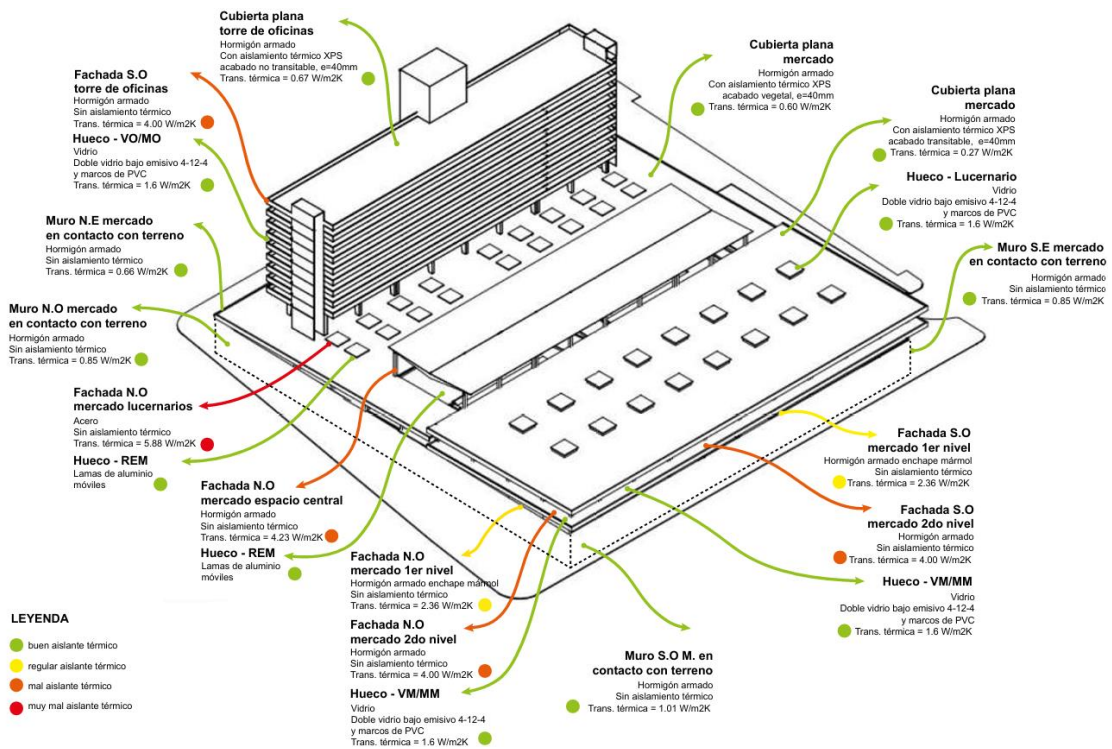


Figura 4. Isometría explicativa de la calificación aplicando la combinación del conjunto de medidas de mejora M9.

La medida más favorable desde el punto de vista energético y económico es M9, que integra mejoras en cubiertas, aberturas e instalaciones. Esta combinación alcanza una calificación energética de 17.6 A, una vida útil de 75 años y un periodo de amortización de 1.4 años, pese a requerir una inversión inicial elevada. Además, incorpora dos medidas de mejora alineada con la rehabilitación social del

edificio: las intervenciones en la cubierta y en las instalaciones, junto con la renovación de la torre de oficinas mediante la sustitución de la iluminación por sistemas LED y la incorporación de un sistema de aire acondicionado.

Los resultados confirman que actuar sobre aberturas e instalaciones, especialmente de forma integrada con la envolvente, genera las mayores reducciones de demanda y emisiones. Esto coincide con estudios previos, como Salgueiro [21] y Calado [23], que destacan la eficacia de combinar mejoras en la envolvente, sistemas e incluso energías renovables, ya que las intervenciones integradas superan a las medidas aisladas.

Además, se evidencia que las soluciones deben adaptarse al contexto climático local, ya que estrategias efectivas en otros países no siempre son igual de rentables en el caso peruano. En conjunto, la estrategia M9 demuestra que los paquetes integrados de rehabilitación permiten maximizar simultáneamente los beneficios energéticos, económicos y sociales del edificio.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones alcanzadas en esta investigación indican que el escenario óptimo es M9, que integra mejoras en cubiertas, aberturas e instalaciones. Este se posiciona como la opción más favorable desde los puntos de vista energético y económico, con una calificación energética global de 17,6 A, un periodo estimado de retorno de la inversión de 1,4 años y una vida útil de 75 años. Este escenario también presenta una dimensión social, ya que proporciona espacios recreativos y de ocio para los usuarios, además de mejorar el confort del edificio. Este resultado refleja la sinergia entre las intervenciones técnicas y su adecuada alineación con los objetivos de rehabilitación social y económica.

Por último, este estudio destaca la importancia de adoptar un enfoque holístico que combine mejoras técnicas con intervenciones sociales. La rehabilitación de edificios no debe centrarse únicamente en la eficiencia energética, sino también en mejorar el entorno social y económico del edificio. La conservación de espacios, como la torre de oficinas, y la creación de áreas de encuentro y ocio en zonas renovadas pueden generar un impacto social positivo, promoviendo el cambio cultural y mejorando la calidad de vida en la comunidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] X. Wang; S. Wang; T. Li. Research on the Performance and Energy Saving of Solar-Coupled Air Source Heat Pump Heating System: A Case Study of College Dormitory in Hot Summer and Cold Winter Zone. *Energies* 2025, 18, 3794. [CrossRef].

[2] A.M Álvarez. Challenges for Latin America: The Agenda for Sustainable Development and Negotiations in the Twenty-First Century. *Probl. Desarro.* 2016, 47, 9–30. [CrossRef]

[3] M. Angrisano.; F. Fabbrocino; P. Iodice.; L.F Girard. The evaluation of historic building energy retrofit projects through the life cycle assessment. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7145. [CrossRef]

- [4] E. Mousavi.; A. Bhattacharya; F. Betz; R. Lautz. Evolution of Ventilation Measures and Energy Performance in Buildings with High Ventilation Demands: A Critical Review. *Energies* 2025, 18, 3603. [CrossRef]
- [5] A.L Cáceres. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Edificaciones Multifamiliares en Lima. Bachelor's Thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru, 2016; pp. 1–69. Available online: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/1234_56789/6682 (accessed on 14 January 2023).
- [6] E. Ruiz. El Análisis de Ciclo de Vida. Metodología de Decisión y Evaluación Ambiental en El Sector de la Edificación. Grado en Arquitectura Técnica, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2016. Available online: <http://hdl.handle.net/10251/66016> (accessed on 16 March 2023).
- [7] Schittich, C. Rehabilitación; Walter de Gruyter: Berlin, Germany, 2013.
- [8] Verónica, E.; Farroñán, R.; Christiam, G.; Chilicaus, F.; Edgardo, L.; Salinas, C.; Rojas, L.C.; Katherine, L.; Cotrina, C.; Licapa redolfo, G.S.; et al. Green Finance and the Energy Transition: A Systematic Review of Economic Instruments for Renewable Energy Deployment in Emerging Economies. *Energies* 2025, 18, 4560. [CrossRef]
- [9] L. B. Caneppele; Nogueira de J, M.C.; de Vasconcellos, A.B. Avaliação Da Eficiência Energética E Custo Benefício No Uso De Coberturas Metálicas Em Supermercados Empregando O Software Energyplus. *Rev. Eletrônica Em Gestão, Educ. e Tecnol. Ambient.* 2013, 9, 1971–1979. [CrossRef]
- [10] Ministerio de Energía y Minas. Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético. Dir. Gen. Efic. Energética. 2020, 2, 1–2. Available online: https://eficienciaenergetica.minem.gob.pe/Content/fileman/Uploads/Documents/Gu%C3%ADas%202022/GUIA%20SECTOR%20RESIDENCIAL_VF3.pdf (accessed on 3 March 2023).
- [11] J.C Ríos-Fernández. Economic and environmental improvements using high energy efficiency HVAC in supermarkets. *Clean Technol. Environ. Policy.* 2020, 22, 1417–1429. [CrossRef]
- [12] L. Cecchinato; M. Corradi; S. Minetto. Energy performance of supermarket refrigeration and air conditioning integrated systems. *Appl. Therm. Eng.* 2010, 30, 1946–1958. [CrossRef]
- [13] R. Sherman; H. Naganathan.; K. Parrish. Energy savings results from small commercial building retrofits in the us. *Energies* 2021, 14, 6207. [CrossRef]
- [13] R. Sherman; H. Naganathan.; K. Parrish. Energy savings results from small commercial building retrofits in the us. *Energies* 2021, 14, 6207. [CrossRef]
- [14] A.L.V. Cordano; E.J. Balistreri. The marginal cost of public funds of mineral and energy taxes in Peru. *Resour. Policy* 2010, 35, 257–264. [CrossRef]
- [15] D.G. De la Cruz Torres; L.F Mazadiego; D. Bolonio; R.R. Pons-Esparver. Long-Term Forecast of Energy Demand towards a Sustainable Future in Renewable Energies Focused on Geothermal Energy in Peru (2020–2050): A LEAP Model Application. *Sustainability* 2024, 16, 4964. [CrossRef]
- [16] A.O Colina-Calvo. A Comprehensive Review of Peru's Energy Scenario: Advancing Energy Access, Sustainability, and Policy Implications. *Rev. Kawsaypacha Soc. y Medio Ambient.* 2024, 2024, 1–24. [CrossRef]

- [17] B. Never; S Kuhn; H. Fuhrmann-Riebel; J. R. Albert; S. Gsell; M. Jaramillo; B. Sendaza. Energy saving behaviours of middle class households in Ghana, Peru and the Philippines. *Energy Sustain. Dev.* 2022, 68, 170–181. [CrossRef]
- [18] G. Alva; L. Liu; X. Huang; G. Fang. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 68, 693–706. [CrossRef]
- [19] P. Liu; E.N Pistikopoulos; Z. Li. An energy systems engineering approach to the optimal design of energy systems in commercial buildings. *Energy Policy* 2010, 38, 4224–4231. [CrossRef]
- [20] Z. Ren. A Literature Review on the Use of Weather Data for Building Thermal Simulations. *Energies* 2025, 18, 3653. [CrossRef]
- [21] M.J Salguero. *Mercados de Hierro en España: Rehabilitación y Mejora Energética*; E.T.S. Arquitectura (UPM): Madrid, Spain, 2021; pp. 49–111.
- [22] SERVICIONACIONALDEMETEOROLOGÍAEHIDROLOGÍADELPERÚ—SENAMHI, *ClimasdelPerú—MapadeClasificación Climática Nacional*. 2010. Available online: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru> (accessed on 20 March 2023).
- [23] C.C. Bonnin. *Rehabilitación Energética del Mercado de San Cristóbal*; E.T.S. Arquitectura (UPM): Madrid, Spain, 2023.