

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y TECNOLOGIA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS INDUSTRIALES EN CLIMA CÁLIDO SECO EXTREMOSO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

FRANCISCO GIBRANNY CURIEL SÁNCHEZ

Director de Tesis

DRA. CRISTINA SOTELO SALAS

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, JUNIO 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS INDUSTRIALES EN CLIMA
CÁLIDO SECO EXTREMOSO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO
PASIVO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

FRANCISCO GIBRANNY CURIEL SÁNCHEZ

Correo electrónico: curielf@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0003-0521-5177

Director de tesis: Dra. Cristina Sotelo Salas
Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

Revisor de tesis: Dra. Claudia Eréndira Vázquez Torres
Identificador ORCID: 0000-0002-5388-0780

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León
Identificador ORCID: 0000-0003-3480-0607

Revisor de tesis: Dra. Verónica Jiménez López
Identificador ORCID: 0000-0003-1564-1479

Revisor de tesis: Dr. Daniel Olvera García
Identificador ORCID: 0000-0002-9293-7604

Mexicali, B.C. 11 de junio de 2025

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, B.C., 11 de junio de 2025

Francisco Gibranny Curiel Sánchez

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 11 de junio de 2025

DR. ALEJANDRO JOSÉ PEIMBERT DUARTE
Director de la Facultad de Arquitectura y Diseño
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente de la Facultad de Arquitectura y Diseño Se emite la presente acta que avala que el estudiante:

FRANCISCO GIBRANNY CURIEL SÁNCHEZ

ha concluido su tesis de grado titulada:

**REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS INDUSTRIALES EN CLIMA CÁLIDO SECO
EXTREMOSO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO**

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTOR DE TESIS

DRA. CRISTINA SOTELO SALAS


FIRMA

DEDICATORIA

A quienes han sido refugio, impulso y sostén en esta etapa que tantas veces pareció interminable.

A mi mamá y mi hermana, por acompañarme desde la raíz. Por confiar sin dudar, por estar sin condiciones, por saber cuándo hablar y cuándo simplemente abrazar. Esta tesis también lleva sus huellas, aunque no estén escritas.

A mis amigos, los que compartieron desvelos, silencios, bromas necesarias y palabras justas. Gracias por quedarse cerca cuando yo me alejaba un poco de todo. Por entender sin explicar.

A ti, que entraste en este capítulo cuando ya casi se cerraba, gracias por hacerlo más llevadero. Por cederme ese lugar tuyo donde terminé escribiendo casi todo. Por tu paciencia, por tu tiempo, por entender sin preguntar demasiado.

A la Dra. Ixchel Camacho, por mostrarme que la arquitectura puede ser mucho más que diseño: puede ser cuidado, visión y compromiso.

Al Dr. Gonzalo Bojórquez, por esa conversación que cambió el rumbo y me convenció de iniciar.

Y a Arq. Luisa Murguía, sin saberlo, una presencia que volvió en el momento justo. Recordarte mientras escribía fue recuperar un poco de esa claridad que a veces sentí perder.

Este trabajo representa lo que aprendí de los otros, lo que resistí conmigo mismo y lo que ahora puedo entregar con gratitud. Porque uno termina lo que empieza, sí, pero nunca lo hace solo.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Dra. Cristina Sotelo Salas, directora de esta tesis, por su guía cercana, su compromiso académico y su generosa disposición para acompañarme en cada fase del proceso. Su apoyo constante, tanto en lo técnico como en lo humano, fue decisivo para el desarrollo, solidez y conclusión de este trabajo.

Reconozco de manera especial a los integrantes del jurado evaluador de tesis: Dra. Claudia Eréndira Vázquez Torres, Dr. Aníbal Luna León, Dra. Verónica Jiménez López y Dr. Daniel Olvera, cuyas observaciones contribuyeron de forma sustancial a fortalecer el marco metodológico, el análisis técnico y la coherencia estructural de este documento.

Mi reconocimiento institucional se dirige al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño (MYDAUD) de la Universidad Autónoma de Baja California, por ofrecer un espacio académico de excelencia para la formación en investigación aplicada, así como por facilitar el equipo de medición necesario para la fase de monitoreo térmico-instrumental, cuyo uso fue determinante en la obtención de datos empíricos confiables.

Agradezco también al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el respaldo económico recibido a través de la beca nacional de estudios de posgrado, que permitió la continuidad y consolidación de esta investigación.

Al Dr. Aníbal Luna León, expreso mi agradecimiento por su asesoría técnica especializada en el uso del software DesignBuilder® y por su acompañamiento en la ejecución de simulaciones energéticas avanzadas durante la etapa final del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD	3
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS	12
ÍNDICE DE FIGURAS.....	16
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1. Planteamiento del Problema.....	8
1.2. Justificación.....	10
1.3. Estado del arte	12
1.3.1. Análisis de estrategias de enfriamiento pasivo en edificios industriales.....	17
1.3.2. Resultados de la revisión de literatura.....	32
1.3.3. Discusión y conclusiones de la revisión de literatura.....	34
1.4. Preguntas de investigación e hipótesis.....	35
1.4.1. Pregunta de investigación	35
1.4.2. Preguntas de investigación secundarias	35
1.4.3. Hipótesis.....	36
1.5. Objetivos de investigación	37
1.5.1. Objetivo general.....	37
1.5.2. Objetivos específicos.....	37
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	39
2.1. Fundamentos de Eficiencia Energética	41
2.1.1. Principios de la eficiencia energética: Conceptos básicos y definiciones	41

2.1.2	Factores que influyen en la Eficiencia Energética en Edificaciones: Envolvente térmica, sistemas HVAC, iluminación natural y artificial.....	42
2.2.	Sistemas Pasivos, Activos e Híbridos de Eficiencia Energética	43
2.2.1	Sistemas Pasivos: Conceptualización y principios.	43
2.2.2	Sistemas Activos: Tecnologías y sistemas mecánicos que sustituyen las estrategias pasivas.....	47
2.2.3	Sistemas Híbridos: Combinación de enfoques pasivos y activos para maximizar la eficiencia energética.	50
2.3.	Retrofit Energético en Edificios Industriales	52
2.3.1	Definición y Conceptos del Retrofit Energético: Eficiencia energética en edificios industriales.....	52
2.3.2	Estrategias de Retrofit Energético: Técnicas aplicadas a la envolvente arquitectónica, HVAC, iluminación y otros sistemas.....	53
2.3.3	Evaluación del Impacto Energético del Retrofit: Metodologías para medir la eficiencia energética tras la implementación del retrofit.....	54
2.4.	Técnicas de Enfriamiento Pasivo	54
2.4.1	Generalidades del Enfriamiento Pasivo: Introducción a las técnicas y su aplicabilidad.	55
2.4.2	Protección Solar y Térmica: Estrategias para reducir la carga térmica.	55
2.4.3.	Amortiguamiento Térmico: Estrategias para el control de la temperatura interna.	57
2.4.4.	Disipación de Calor: Estrategias para disipar calor.....	58
2.5.	Normativa y Regulación	59
2.5.1	Marco Regulatorio Local e Internacional: Impacto de la legislación en el diseño operación de edificios.....	59
2.5.2	Cumplimiento y Certificaciones: Relevancia de las certificaciones energéticas.	60
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		62
3.1	Diseño metodológico del experimento y estrategia de simulación	64
3.1.1	Tipo de estudio y enfoque de investigación	65

3.1.2 Alcance espacial y temporal del análisis.....	66
3.1.3 Criterios técnicos de selección del caso de estudio	70
3.1.4 Características físicas y operativas detalladas del objeto de estudio ...	71
3.2 Caracterización del objeto de estudio	75
3.2.1 Descripción arquitectónica general	75
3.2.2 Distribución funcional y térmica por zonas	76
3.2.3 Sistemas constructivos y elementos térmicos.....	77
3.2.4 Condiciones de uso, ocupación y climatización	80
3.2.5 Zonificación térmica modelada vs. zonas no accesibles	82
3.4 Instrumentación, monitoreo y análisis climático.....	84
3.4.1 Objetivo y enfoque del monitoreo	85
3.4.2 Instrumentos de medición utilizados.....	86
3.4.3 Ubicación estratégica de sensores (criterios técnicos y normativos).....	91
3.4.4 Periodo de monitoreo, días críticos y cobertura temporal.....	93
3.4.5 Levantamiento termográfico	95
3.4.6 Análisis climático histórico	103
3.5 Modelado energético en DesignBuilder®.....	104
3.5.1 Construcción geométrica del modelo.....	104
3.5.2 Lógica de zonificación térmica y nodos.....	104
3.5.3 Propiedades termofísicas de la envolvente.....	105
3.5.4 Configuración operativa por zona (ocupación, iluminación, equipos).	106
3.5.5 Configuración de ventilación natural y límites térmicos.....	107
3.6 Escenarios simulados.....	108
3.6.1 Codificación y criterios generales (EIM_01 a EIM_30).....	109
3.6.2 Escenarios individuales por tipo de estrategia.....	110
3.6.3 Escenarios combinados integrados.....	118
3.6.4 Tabla maestra de escenarios: codificación, intervención, simulación.	119
3.6.5 Estrategias descartadas y justificación técnica.....	121
3.7 Validación y ajuste del modelo	122
3.7.1 Justificación del Método Seleccionado	122
3.7.2 Definición Matemática del Índice PMARE.....	122

3.7.3 Aplicación Técnica del Método de Validación	123
3.7.4 Interpretación de Resultados y Validación	124
3.8 Análisis de resultados y técnicas estadísticas	125
3.8.1 Variables extraídas y criterios comparativos	125
3.8.2 Métodos de procesamiento y herramientas gráficas.....	127
3.9 Alcances, limitaciones y replicabilidad	128
3.9.1 Limitaciones técnicas y de acceso.....	128
3.9.2 Alcance contextual y tipológico del método.	128
3.9.3 Condiciones para la replicabilidad del procedimiento.	129
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	131
4.1 Resultados individuales por categoría de estrategias pasivas.....	132
4.1.1 Estrategias de protección solar y térmica	133
4.1.2 Estrategias de amortiguamiento térmico.....	158
4.1.3 Estrategias de disipación de calor	177
4.5 Análisis comparativo integral entre escenarios individuales.....	200
4.5.1 Estrategias de protección solar y térmica	201
4.5.2 Estrategias de amortiguamiento térmico.....	202
4.5.3 Estrategias de disipación de calor	205
4.5.4 Comparación global de escenarios individuales	207
4.6 Selección preliminar de escenarios integrales óptimos	208
4.6.1 Escenarios combinados propuestos	208
4.6.2 Resultados simulados de escenarios integrales propuestos.....	210
Escenario Integral A – Evaluación del desempeño térmico	210
Escenario Integral B – Evaluación del desempeño térmico	211
4.7 Síntesis de hallazgos y conclusiones del capítulo.....	213
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	215
5.1 Confirmación del cumplimiento de objetivos	216
5.3 Conclusiones generales	217
5.4 Aportaciones técnicas de la investigación	218
5.5 Líneas de investigación futura	219

5.6 Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	219
REFERENCIAS	220

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sintaxis de Búsqueda y Resultados.....	13
Tabla 2. Síntesis de aspectos relevantes de la revisión de artículos de investigación.	14
Tabla 3. Estrategias de protección solar y térmica en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.	20
Tabla 4. Estrategias de amortiguamiento térmico en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.	23
Tabla 5. Estrategias de disipación de calor en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.	27
Tabla 6. Estrategias combinadas en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.	31
Tabla 7. Desglose técnico por etapa metodológica del estudio.....	63
Tabla 8. Clasificación estratégica de las intervenciones pasivas.....	64
Tabla 9. Componentes técnicos del diseño metodológico adoptado.....	66
Tabla 10. Parámetros climáticos mensuales – Mexicali, Baja California.	68
Tabla 11. Desglose técnico por etapa metodológica del estudio.....	69
Tabla 12. Componentes técnicos del diseño metodológico adoptado.....	70
Tabla 13. Nodos térmicos del caso de estudio	72
Tabla 14. Parámetros operativos y de programación térmica por zona.....	74
Tabla 15. Caracterización de ocupación y aporte térmico por zona funcional.....	80
Tabla 16. Cargas internas por equipos, iluminación y densidad térmica general .	81
Tabla 17. Lineamientos técnicos de instrumentación térmica aplicada	85
Tabla 18. Especificaciones técnicas del datalogger Elitech RC-51H.....	87
Tabla 19. Especificaciones técnicas del registrador HOBO U12-013.....	88
Tabla 20. Especificaciones técnicas de la cámara infrarroja FLIR C5.....	89

Tabla 21. Especificaciones técnicas del sistema auxiliar de monitoreo climático exterior.....	90
Tabla 22. Nomenclatura y ubicación de los sensores térmicos instalados.	91
Tabla 23. Criterios normativos y técnicos de emplazamiento de sensores.	92
Tabla 24. Parámetros térmicos representativos del día crítico seleccionado (16 de mayo).	94
Tabla 25. Configuración de emisividad aplicada.....	96
Tabla 26. Registros térmicos superficiales por sector y horario de captura.....	97
Tabla 27. Estadísticos climáticos representativos — Archivo EPW TMY Mexicali.	103
Tabla 28. Zonificación térmica configurada en el modelo.....	105
Tabla 29. Configuración termofísica aplicada al escenario base.....	105
Tabla 30. Resumen de cargas internas parametrizadas en el modelo.	107
Tabla 31. Configuración de ventilación y límites térmicos.	108
Tabla 32. Clasificación metodológica de los escenarios por bloque estratégico.	109
Tabla 33. Descripción de escenarios de protección solar y térmica (EIM_01 a EIM_10).	110
Tabla 34. Descripción de escenarios de amortiguamiento térmico en cubierta (EIM_11–EIM_15).	112
Tabla 35. Descripción de escenarios de amortiguamiento térmico en muros perimetrales (EIM_16–EIM_19).	113
Tabla 36. Descripción de escenarios de ventilación natural por aperturas operables (EIM_20–EIM_26).....	114
Tabla 37. Descripción de escenarios de disipación de calor mediante dispositivos pasivos en cubierta y fachadas (EIM_27 a EIM_30).	115

Tabla 38. Propiedades térmicas, ópticas y constructivas de materiales empleados en los escenarios EIM_01 a EIM_30.....	116
Tabla 39. Codificación y descripción de escenarios simulados (EIM_01 a EIM_30).	119
Tabla 40.	123
Tabla 41. Criterios de interpretación del índice PMARE.....	125
Tabla 42. Escenarios de protección solar y térmica simulados. Elementos intervenidos y clasificación técnica.	133
Tabla 43. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base.	136
Tabla 44. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_01 – EIM_02.	139
Tabla 45.	142
Tabla 46.	145
Tabla 47. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_07 – EIM_08.	148
Tabla 48. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_07 – EIM_08.	151
Tabla 49. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_09 – EIM_10.	154
Tabla 50. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_09 – EIM_10.	157
Tabla 51. Escenarios de amortiguamiento térmico simulados. Material, espesor y elemento intervenido EIM_11 – EIM_19.....	158
Tabla 52.	165
Tabla 53. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_11 – EIM_15.	168
Tabla 54. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_16 – EIM_19.	173
Tabla 55. Reducción o incremento mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_16 – EIM_19	177

Tabla 56. Escenarios de disipación de calor simulados. Tipo de intervención y componente arquitectónico involucrado.....	178
Tabla 57. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_20 – EIM_23.	183
Tabla 58. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_20 – EIM_23.	186
Tabla 59. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_24 – EIM_26.	191
Tabla 60. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_24 – EIM_26.	193
Tabla 61. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_27 – EIM_30.	197
Tabla 62. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_01 al EIM_10 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).	202
Tabla 63. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_11 al EIM_19 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).	204
Tabla 64. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_20 al EIM_30 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).	207
Tabla 65. Escenario integral A – Estrategias pasivas con mayor reducción térmica.	209
Tabla 66. Escenario integral B – Estrategias pasivas con mayor reducción térmica.	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de planta y orientación del volumen intervenido	73
Figura 2. Modelo energético del volumen intervenido en DesignBuilder®.	84
Figura 3. Esquema de ubicación de sensores térmicos instalados.	93
Figura 4. Plano esquemático de ubicación de registros termográficos.	98
Figura 5. Registros termográficos representativos – Cubierta horizontal interior (área de prácticas).	99
Figura 6. Registros termográficos representativos – Frente vertical de cubierta Este.	100
Figura 7. Registros termográficos representativos – Fachada norte operativa. .	101
Figura 8. Registros termográficos representativos – Fachada norte administrativa (acceso metálico).	102
Figura 9. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_01 vs. escenario base.	135
Figura 10. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_02 vs. escenario base.	136
Figura 11. Evolución anual de temperatura operativa — Escenarios EIM_01 y EIM_02 vs. escenario base.	137
Figura 12. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_01–EIM_02 vs. base	138
Figura 13. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_03 vs. escenario base.	140
Figura 14. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_04 vs. escenario base.	141
Figura 15. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_05 vs. escenario base.	142

Figura 16. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_03 – EIM_05 vs. escenario base.....	143
Figura 17. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_03 – EIM_05 vs. escenario base.....	144
Figura 18. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_07 vs. escenario base.....	146
Figura 19. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_08 vs. escenario base.....	147
Figura 20. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.....	149
Figura 21. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.....	150
Figura 22 Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_09 vs. escenario base.....	153
Figura 23. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_10 vs. escenario base.....	154
Figura 24. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_09–EIM_10 vs. escenario base.....	155
Figura 25. Temperatura operativa mensual: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.	156
Figura 26. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_11 vs. escenario base.....	160
Figura 27. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_12 vs. escenario base.....	161
Figura 28. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_13 vs. escenario base.....	162

Figura 29. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_14 vs. escenario base.....	163
Figura 30. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_15 vs. escenario base.....	165
Figura 31. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_11–EIM_15 vs. escenario base.....	166
Figura 32. Temperatura operativa mensual: EIM_11–EIM_15 vs. escenario base.	167
Figura 33. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_16 vs. escenario base.....	170
Figura 34. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_17 vs. escenario base.....	171
Figura 35. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_18 vs. escenario base.....	172
Figura 36. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_19 vs. escenario base.....	173
Figura 37. Temperatura operativa mensual: EIM_16–EIM_19 vs. escenario base	174
Figura 38. Temperatura operativa mensual: EIM_16–EIM_19 vs. escenario base	175
Figura 39. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_20 vs. escenario base.....	180
Figura 40. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_21 vs. escenario base.....	181
Figura 41. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_22 vs. escenario base.....	182

Figura 42. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_23 vs. escenario base.....	183
Figura 43. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_20–EIM_23 vs. escenario base.....	184
Figura 44. Temperatura operativa mensual: EIM_20–EIM_23 vs. escenario base.	185
Figura 45. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_24 vs. escenario base.....	188
Figura 46. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_25 vs. escenario base.....	189
Figura 47. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_26 vs. escenario base.....	190
Figura 48. Temperatura operativa mensual: EIM_24–EIM_26 vs. escenario base.	191
Figura 49. Temperatura operativa mensual: EIM_24–EIM_26 vs. escenario base.	192
Figura 50. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_27 vs. escenario base.....	194
Figura 51. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_28 vs. escenario base.....	195
Figura 52. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_29 vs. escenario base.....	196
Figura 53.	197
Figura 54. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_27–EIM_30 vs. escenario base.....	198
Figura 55. Temperatura operativa mensual: EIM_27–EIM_30 vs. escenario base.	199

Figura 56. Comparación global de ΔT máxima mensual en los treinta escenarios individuales (EIM_01 a EIM_30). 208

Figura 57. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: Escenario Integral A vs. escenario base..... 211

Figura 58. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: Escenario Integral B vs. escenario base..... 212

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano e industrial en zonas áridas ha incrementado la demanda energética de los edificios industriales, especialmente en aquellas tipologías constructivas predominantes que favorecen la transferencia de calor hacia el interior, al incorporar muros sin aislamiento térmico, cubiertas metálicas expuestas y grandes volúmenes interiores de aire. Estas configuraciones constructivas elevan la carga térmica externa y aumentan la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.

Desde la perspectiva ambiental y normativa, la reducción del consumo energético en estos edificios constituye una prioridad estratégica, tanto por su impacto económico como ambiental. Esta investigación se vincula con los marcos internacionales de sostenibilidad energética, en particular con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al proponer soluciones de bajo impacto ambiental orientadas a mitigar las emisiones asociadas al uso intensivo de sistemas activos de climatización. Asimismo, reconoce la necesidad de establecer criterios de gestión energética adaptados a los contextos regionales con alta exigencia térmica, como el de Mexicali, Baja California.

En esta región, las temperaturas exteriores superan regularmente los 45 °C durante los meses de mayor carga térmica, mientras que los escenarios de cambio climático proyectados por el IPCC estiman un incremento regional promedio de hasta 2.5 °C adicionales hacia mediados de siglo. Este agravamiento térmico prolongará los periodos de sobrecarga térmica y aumentará la presión sobre las edificaciones existentes.

Frente a esta problemática, la intervención sobre la envolvente arquitectónica constituye una estrategia técnicamente prioritaria, al ser el primer mecanismo de control de las ganancias térmicas exteriores. Las técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas a la envolvente no requieren suministro energético adicional, permiten adaptarse a distintas configuraciones constructivas y reducen la carga base que posteriormente gestionan los sistemas activos, de esa manera se optimiza el desempeño energético integral del edificio. Además, representan alternativas

económicamente viables frente a los costos acumulados de operación de los sistemas de climatización mecánica en entornos de alta demanda térmica.

Pese al desarrollo registrado en la arquitectura bioclimática, persiste un vacío metodológico en la aplicación rigurosa de técnicas pasivas de enfriamiento en edificios industriales ubicados en climas cálido secos extremos. La mayoría de los estudios existentes se ha centrado en viviendas y edificios comerciales, mientras que el sector industrial, particularmente en construcciones ligeras de baja inercia térmica, ha recibido menor atención. Además, gran parte de estas investigaciones carece de validación empírica mediante monitoreo térmico de campo o no integra simulación energética calibrada bajo parámetros de replicabilidad verificables, lo que limita la aplicabilidad técnica de los resultados y dificulta su transferencia operativa.

El presente estudio aborda esta brecha mediante una metodología que integra mediciones térmicas instrumentales, modelado digital con simulación energética calibrada y validación estadística a través del índice Percent Mean Absolute Relative Error (PMARE). Este enfoque permite generar resultados trazables y comparables, aporta evidencia técnica para sustentar decisiones de diseño, rehabilitación y regulación energética en el sector industrial de climas áridos.

RESUMEN

El desempeño térmico de las edificaciones industriales ligeras localizadas en climas cálido-seco extremoso plantea retos críticos vinculados a la acumulación de cargas térmicas sensibles. Esta investigación analiza el efecto de técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas sobre la envolvente arquitectónica de un edificio industrial representativo en Mexicali, Baja California, como estrategia de rehabilitación energética.

Se adoptó un diseño metodológico cuantitativo, comparativo y cuasi experimental. El procedimiento incorporó monitoreo térmico instrumental, modelado tridimensional digital mediante DesignBuilder® v7.0 (con el motor EnergyPlus® v9.6.0), y validación mediante el índice Percent Mean Absolute Relative Error (PMARE), aplicado sobre registros obtenidos en los periodos de máxima carga térmica.

Se simularon treinta escenarios pasivos agrupados en tres categorías estratégicas: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor. Cada intervención fue evaluada de forma individual bajo condiciones de contorno constantes, permitiendo aislar su impacto térmico específico.

Los resultados reflejaron reducciones térmicas diferenciadas según el tipo de estrategia, material, espesor y mecanismo físico involucrado. Las combinaciones más eficientes integraron aislamiento de poliuretano 4" en cubierta (ΔT máx. -4.69 °C), sombreado horizontal del 75 % (ΔT máx. -1.98 °C) y ventilación combinada día-noche del 40 % (ΔT máx. -1.61 °C), logrando reducciones acumuladas superiores a -6.7 °C durante los meses de mayor demanda térmica.

Los hallazgos ofrecen criterios técnicos replicables para la rehabilitación energética de edificios industriales en climas áridos, alineándose con los principios de eficiencia energética y acción climática sostenible.

Palabras clave: Enfriamiento pasivo, Rehabilitación energética, Clima cálido seco extremoso, Simulación térmica, Edificios industriales.

ABSTRACT

The thermal performance of lightweight industrial buildings located in extreme hot-dry climates presents critical challenges due to high sensible heat loads that directly impact energy efficiency and cooling demands. This study analyzes the effect of passive cooling strategies applied to the building envelope of a representative industrial facility in Mexicali, Baja California, as part of an energy retrofit approach.

A quantitative, comparative, and quasi-experimental research design was applied. The methodological process integrated on-site thermal monitoring, digital 3D modeling through DesignBuilder® v7.0 (with EnergyPlus® v9.6.0 simulation engine), and validation using the Percent Mean Absolute Relative Error (PMARE) index, applied to monitored data collected during peak thermal periods.

Thirty passive intervention scenarios were simulated, grouped into solar and thermal protection, thermal buffering, and heat dissipation strategies. Each scenario was evaluated individually under constant boundary conditions, allowing precise identification of its thermal impact.

Results showed differentiated reductions depending on strategy type, material properties, and applied thickness. The most effective scenarios—roof insulation with 4" polyurethane (ΔT max -4.69 °C), horizontal shading (75% coverage, ΔT max -1.98 °C), and combined day-night ventilation with 40% operable openings (ΔT max -1.61 °C)—were integrated into optimal combinations, achieving cumulative reductions exceeding -6.7 °C during the peak load season.

This research provides replicable technical criteria for the design of energy retrofits in industrial buildings located in arid regions. The findings are consistent with international principles of sustainable energy management and climate action aimed at reducing sensitive thermal loads.

Keywords: Passive cooling, Energy retrofit, Hot dry extreme climate, Thermal simulation, Industrial buildings.



CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

El cambio climático, intensificado por el aumento de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), ha generado impactos ambientales, sociales y económicos de magnitud global. Según el Sixth Assessment Report del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022), las concentraciones atmosféricas de CO₂ han superado los 410 ppm, lo que marca niveles sin precedentes en los últimos 800,000 años. Este incremento ha contribuido a un alza sostenida de la temperatura media global, estimada en 1.2 °C por encima de los niveles preindustriales, lo cual ha modificado patrones climáticos y ha acentuado la vulnerabilidad de sectores altamente demandantes de energía, como el industrial.

El sector de la edificación, que incluye edificaciones industriales, representa aproximadamente el 37 % de las emisiones globales de CO₂ y el 34 % del consumo energético mundial, de acuerdo con el Global Status Report for Buildings and Construction (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

En climas cálido secos extremos, como el de Mexicali, Baja California, estas cifras adquieren una dimensión crítica. La ciudad presenta temperaturas que superan los 45 °C durante los meses cálidos y niveles de humedad relativa inferiores al 20 %, lo que genera condiciones climáticas extremas con altas cargas térmicas sobre las envolventes edificadas.

En este contexto, la demanda energética destinada a climatización puede alcanzar hasta el 70 % del consumo eléctrico total durante los meses de mayor carga térmica, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021). Esta situación incrementa los costos operativos del sector, intensifica su huella de carbono y agrava la presión sobre la infraestructura energética local, cuya capacidad ya enfrenta tensiones ante el crecimiento industrial proyectado.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2022), el sector industrial en Mexicali consume aproximadamente el

32 % de la energía regional, con una tendencia de crecimiento del 2 % anual si no se adoptan medidas de eficiencia energética.

Pese a los avances documentados en materia de diseño pasivo en climas templados y cálido-húmedos, persiste una brecha significativa en la adaptación rigurosa de estas estrategias a entornos áridos extremos. En contextos como el de Mexicali, la aplicación de soluciones pasivas en edificaciones industriales sigue siendo limitada, particularmente en lo que respecta a intervenciones documentadas mediante análisis energético cuantitativo.

Así, se plantea como problema central la escasa integración de técnicas de enfriamiento pasivo en la rehabilitación de edificaciones industriales en climas cálido-secos extremos. Esta ausencia de estrategias adaptadas al contexto climático local compromete los objetivos de sostenibilidad energética regional y limita la capacidad del sector para mitigar su impacto ambiental sin recurrir exclusivamente a tecnologías activas de alto consumo energético.

1.2. Justificación

La optimización del desempeño energético en edificaciones industriales ubicadas en climas cálido seco extremoso representa una prioridad técnica y ambiental de gran relevancia. En regiones como Mexicali, las condiciones de alta temperatura, baja humedad relativa y radiación solar intensa generan una presión térmica severa sobre las envolventes constructivas, lo cual se traduce en una demanda energética considerable para climatización. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021), en climas cálido-secos, la demanda de energía para refrigeración puede representar hasta el 70 % del consumo eléctrico durante los meses de mayor carga térmica, lo que resulta especialmente crítico en ciudades con características climáticas como Mexicali.

Desde una perspectiva ambiental, reducir el consumo energético en estos edificios permite mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en consonancia con los objetivos planteados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) en su Sexto Informe de Evaluación. Las técnicas de enfriamiento pasivo ofrecen soluciones viables al no depender de fuentes externas de energía, lo cual las convierte en una estrategia coherente con la transición energética global y con la descarbonización progresiva del sector de la edificación (World GBC, 2022).

Desde el punto de vista económico, la eficiencia energética en edificios industriales puede representar una reducción del 15 al 30 % en los costos operativos anuales, dependiendo del tipo de intervención y del clima (ACEEE, 2023). En regiones como Mexicali, donde la industria maquiladora tiene un papel estructural en la economía local, estas mejoras contribuyen no solo a la rentabilidad operativa, sino también a la atracción de inversión y a la estabilidad del empleo en un entorno cada vez más condicionado por los costos energéticos (INEGI, 2022).

Técnicamente, organismos como el American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE, 2023) y el National Institute of Standards and Technology (NIST, 2023) destacan que la integración sinérgica entre estrategias pasivas de control térmico y sistemas mecánicos eficientes permite mejoras de hasta un 30 % en la

eficiencia energética global de edificios industriales en climas cálido-secos. En este sentido, las intervenciones pasivas en la envolvente arquitectónica constituyen una estrategia comprobada y adaptable, cuya eficacia puede optimizarse mediante simulación energética paramétrica (NIST, 2023).

En el ámbito normativo, la ISO 50001:2018 proporciona un marco robusto para la gestión energética, aunque su implementación efectiva en entornos áridos como Mexicali requiere adaptaciones a las condiciones constructivas y climáticas locales. Las normativas mexicanas actuales, centradas mayoritariamente en edificios comerciales y residenciales, aún no integran lineamientos técnicos específicos para edificaciones industriales en zonas de alta carga térmica, lo cual limita la adopción de soluciones pasivas a escala sectorial (CONUEE, 2022).

Así, esta investigación se justifica al proponer la evaluación técnica de intervenciones pasivas aplicadas a la envolvente de un edificio industrial representativo, mediante simulación energética calibrada. Los resultados esperados permitirán generar evidencia cuantificable sobre el comportamiento térmico de estas estrategias, lo cual constituye un insumo valioso para el diseño de políticas públicas, lineamientos técnicos y criterios de diseño energético adaptados. Con ello, se contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima) (UNEP, 2023).

1.3. Estado del arte

El estudio del enfriamiento pasivo en edificaciones industriales tiene antecedentes teóricos sólidos desde la segunda mitad del siglo XX. Givoni (1976) propuso principios para climas áridos basados en la ventilación natural y el aislamiento térmico. Yeang (1994) adaptó estos fundamentos al diseño bioclimático en edificios de gran escala, mientras que Van der Ryn y Cowan (1996) subrayaron el vínculo entre eficiencia energética y entorno en el marco del diseño ecológico. Si bien estas propuestas resultaron fundamentales para la arquitectura pasiva contemporánea, fueron desarrolladas en contextos residenciales o administrativos, con condiciones térmicas más controladas y menores exigencias operativas que las de un edificio industrial moderno.

Actualmente, la investigación se ha orientado hacia la adaptación de estas estrategias a infraestructuras industriales, particularmente en regiones de clima cálido seco extremo. En ubicaciones como Mexicali, donde la radiación solar es intensa, la humedad relativa es baja y las amplitudes térmicas diarias superan los rangos de confort, las técnicas pasivas tradicionales enfrentan limitaciones. La evidencia reciente sugiere que la efectividad de cada solución depende no solo de su desempeño térmico aislado, sino de su integración con las condiciones constructivas, operativas y climáticas específicas del sitio.

Para sustentar esta revisión, se diseñó una estrategia de búsqueda bibliográfica estructurada, orientada a recuperar literatura científica pertinente, técnica y actualizada. Se consultaron las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, se utilizaron combinaciones de términos clave como passive cooling, industrial buildings, thermal comfort y energy retrofit, integrados mediante operadores booleanos AND y OR. El periodo de búsqueda abarcó de 1980 a 2025, incluyendo tanto estudios empíricos como simulaciones numéricas y revisiones sistemáticas. La construcción de las expresiones de búsqueda, organizadas por eje temático, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Sintaxis de Búsqueda y Resultados

Palabras clave utilizadas	Estructura de la búsqueda	Resultados obtenidos	Rango de años
Rehabilitación energética: Energy retrofit, building renovation, industrial buildings	("energy retrofit" OR "building renovation") AND ("industrial buildings")	23	1984–2025
Técnicas de enfriamiento: Passive cooling, passive techniques, natural cooling, cooling strategies	("passive cooling" OR "passive techniques" OR "natural cooling" OR "cooling strategies") AND ("industrial buildings")	18	1992-2025
Confort térmico: Thermal comfort, comfort optimization	("thermal comfort" OR "comfort optimization") AND ("industrial buildings")	117	1984–2025
Diseño pasivo: Passive design, energy-efficient design, sustainable retrofit	("passive design" OR "energy-efficient design" OR "sustainable retrofit") AND ("industrial buildings")	30	1981–2025
Ventilación e aislamiento: Ventilation techniques, natural ventilation, insulation methods, thermal insulation	("ventilation techniques" OR "natural ventilation" OR "insulation methods" OR "thermal insulation") AND ("industrial buildings")	82	1976–2025
Gestión energética: Energy management, energy optimization	("energy management" OR "energy optimization") AND ("industrial buildings")	253	1974–2025

Nota: Elaboración propia (2025).

Posteriormente, se depuraron duplicados y se aplicaron criterios de pertinencia para seleccionar los estudios más relevantes. El corpus final quedó conformado por treinta artículos que cumplen con los criterios de tipología edificatoria, representatividad climática y enfoque metodológico. Para organizar esta información, se desarrolló una matriz comparativa con los siguientes campos: autor, año, ubicación geográfica, clasificación climática, tipo de estudio, objeto de análisis y categoría de estrategia pasiva abordada. Esta sistematización, presentada en la Tabla 2, estructura el análisis técnico que se desarrolla en los siguientes apartados del capítulo.

Tabla 2. Síntesis de aspectos relevantes de la revisión de artículos de investigación.

Autor/Año	Ciudad/ País	Clima Köppen- Geiger	Tipo de estudio	Objeto de estudio	Estrategia de enfriamiento pasivo (EEP)
Hu (2018)	Shanghái, China	Húmedo subtropical (Cfa)	Experimental y numérico	Edificio industrial	Protección solar y térmica
Yew et al. (2018)	Malasia	Tropical (Af)	Experimental y numérico	Edificio industrial	Estrategias combinadas (protección + disipación)
Slavković (2019)	Novi Pazar, Serbia	Continental húmedo (Cfb)	Simulación numérica	Edificio industrial	Estrategias combinadas
Bhamare et al. (2019)	Diversas ubicaciones	Diversos climas	Revisión sistemática	Edificación	Estrategias combinadas
Amatalraof et al. (2019)	Seiyun, Yemen	Desértico (BWh)	Experimental y numérico	Prototipo de edificación	Disipación de calor
Lyu et al. (2019)	Buffalo, EE. UU.	Continental húmedo (Dfa)	Experimental y numérico	Edificio industrial	Disipación de calor
Espino-Reyes et al. (2020)	México (varias regiones)	Diversos climas	Simulación numérica	Edificio industrial	Estrategias combinadas
László et al. (2020)	Hungría	Océánico templado (Cf)	Experimental y numérico	Edificio industrial	Disipación de calor
Vytchikov et al. (2020)	Kazajistán	Continental frío (Dfb)	Simulación numérica	Edificio industrial	Amortiguamiento térmico
Li et al. (2020)	China	Húmedo subtropical (Cfa)	Simulación numérica	Panel de muro industrial	Amortiguamiento térmico
Dervishi & Karamani (2020)	Albania	Mediterráneo (Csa)	Simulación numérica	Edificio industrial	Amortiguamiento térmico

Autor/Año	Ciudad/ País	Clima Köppen- Geiger	Tipo de estudio	Objeto de estudio	Estrategia de enfriamiento pasivo (EEP)
Othman et al. (2020)	El Cairo, Egipto	Desértico cálido (BWh)	Simulación numérica	Espacio urbano	Disipación de calor
Kaboré et al. (2020)	Toulouse, Francia	Oceánico templado (Cfb)	Simulación numérica	Cubiertas verdes	Disipación de calor
La Roche et al. (2020)	El Paso, EE. UU.	Árido cálido (BWh)	Experimental y numérico	Edificio académico	Estrategias combinadas (amortiguamiento + disipación)
Boobalakrishnan et al. (2021)	Chennai, India	Tropical húmedo (Am)	Experimental	Edificio con cubierta metálica	Amortiguamiento térmico
Tian et al. (2021)	China (n.e.)	Continental húmedo (Dwa)	Experimental y numérico	Edificio industrial	Protección solar y térmica
Mano & Thongtha (2021)	Tailandia	Tropical monzónico (Am)	Experimental	Cubierta con PCM	Amortiguamiento térmico
Vinod Kumar et al. (2021)	Sohar, Omán	Desértico cálido (BWh)	Experimental	Edificio industrial	Protección solar y térmica
Chen et al. (2021)	China (región costera)	Subtropical húmedo (Cfa)	Simulación numérica	Cubierta reflectiva selectiva	Disipación de calor
Rawat & Singh (2021)	India (n.e.)	Clima compuesto (composite)	Experimental	Modelo de techo fresco (cool roof)	Protección solar y térmica
Katona (2022)	Pécs, Hungría	Oceánico templado (Cfb)	Simulación numérica	Edificio industrial	Disipación de calor
Crespo Sánchez & Masip Vilà (2022)	Barcelona, España	Mediterráneo (Csa)	Simulación numérica	Cubierta termocrómica	Protección solar y térmica
Zhukov et al. (2022)	Rusia (n.e.)	Continental subártico (Dfc)	Experimental	Sistema de aislamiento con espuma PE	Amortiguamiento térmico

Autor/Año	Ciudad/ País	Clima Köppen- Geiger	Tipo de estudio	Objeto de estudio	Estrategia de enfriamiento pasivo (EEP)
Rinawa et al. (2022)	India (n.e.)	Tropical sabana (Aw)	Experimental	Cubierta metálica con nano- recubrimiento	Amortiguamiento térmico
Ciacci et al. (2023)	Italia (n.e.)	Mediterráneo (Csa)	Simulación numérica	Edificio industrial con muro verde	Disipación de calor
Bach et al. (2023)	Dhaka, Bangladesh	Tropical monzónico (Am)	Experimental y simulación	Edificio industrial	Estrategias combinadas (sombreado + aislamiento)
Krishnan et al. (2023)	Tiruchirappalli, India	Tropical sabana (Aw)	Experimental y simulación	Prototipo de torre de viento	Disipación de calor
Alhuwayil et al. (2023)	Khamis Mushait, Arabia Saudita	Desértico cálido (BWh)	Simulación numérica	Edificio multiespacio	Estrategias combinadas (comparativa sombra vs aislamiento)
Ergün & Bekleyen (2024)	Regiones áridas tradicionales	Desértico cálido (BWh)	Revisión y propuesta taxonómica	Arquitectura vernácula	Estrategias combinadas (protección + disipación)
Yaman (2025)	Turquía (diversas regiones)	Diversos (incluye BWh, Csa)	Simulación + optimización ANN/PSO	Edificio industrial	Estrategias combinadas (protección + amortiguamiento + disipación)

Nota: El clima se clasificó según Köppen-Geiger (Af, Am, Aw, BWh, Cfa, Cfb, Csa, Dfb, Dfc, Dwa). Los estudios se clasificaron como experimentales, de simulación numérica o de revisión estructurada. Las estrategias de enfriamiento pasivo (EEP) se agruparon en tres categorías funcionales: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor. Las estrategias combinadas integran dos o más de estas. PCM: material de cambio de fase; ANN/PSO: redes neuronales artificiales y optimización por enjambre de partículas. Elaboración propia (2025).

1.3.1. Análisis de estrategias de enfriamiento pasivo en edificios industriales

Este apartado realiza un análisis técnico detallado de las estrategias de enfriamiento pasivo aplicadas en edificios industriales, basado en la revisión de literatura previamente sintetizada. Con el objetivo de comprender su efectividad y aplicabilidad en climas cálido seco extremo, los estudios seleccionados se organizan en tres grandes categorías: protección solar, amortiguamiento térmico y disipación de calor.

Dentro de cada categoría se analizan de manera crítica los estudios que reportan resultados cuantitativos, tales como porcentajes de disminución de temperatura interior, mejoras en las propiedades térmicas de los materiales, impacto en la carga térmica del edificio o consideraciones de viabilidad técnica y económica. Este análisis proporciona las bases necesarias para la selección fundamentada de estrategias pasivas que serán consideradas en el desarrollo posterior de esta investigación.

1.3.3.1. Protección solar y térmica.

Este apartado analiza estrategias pasivas orientadas a reducir la carga térmica externa sobre la envolvente industrial. En climas cálido secos extremos, estas soluciones constituyen la primera barrera frente a la radiación solar directa. La revisión técnica incluye dispositivos de sombreado, recubrimientos reflectantes, fachadas ventiladas y sistemas vegetales aplicados a muros y cubiertas.

Hu (2018) propuso una intervención integral en un edificio industrial ubicado en Shanghái (Cfa), incorporó redistribución de vanos, protecciones solares fijas, techos blancos y ventilación natural programada. Mediante simulaciones en eQUEST, se reportaron reducciones térmicas de hasta 8,959.7 kWh mensuales y un ahorro anual en iluminación superior a 120,000 RMB. Si bien el estudio se ubica en un clima húmedo, sus medidas de control solar y reflectancia pueden adaptarse a entornos áridos como Mexicali, con ajustes en la ventilación y el control de

humedad. La propuesta vincula forma arquitectónica y eficiencia energética, aunque no evalúa directamente el confort térmico, lo que limita su extrapolación completa.

Vinod Kumar et al. (2021) evaluaron un sistema pasivo de doble piel para cubierta, compuesto por una lámina reflectante (albedo 0.90), aislamiento EPS de 50 mm y una cámara ventilada. En condiciones reales de verano en Omán (BWh), la temperatura interior se redujo en 4.7 °C, y la superficie exterior de la cubierta, en 11.1 °C. El estudio confirma que la combinación de reflexión, masa aislante y convección pasiva puede atenuar los tres mecanismos de transferencia térmica sin necesidad de sistemas activos. Aunque se trabajó a escala reducida, los principios constructivos y los materiales empleados son perfectamente aplicables al entorno industrial real.

Tian et al. (2021) estudiaron techumbres de membrana delgada en un edificio industrial en Xi'an (Cwa), evaluaron 13 materiales con distintas propiedades ópticas. Se comprobó que la transmitancia solar influye más que la absorptancia en la ganancia térmica interior. En condiciones críticas, se alcanzaron cargas instantáneas de hasta 225.8 kW y variaciones térmicas de 5.5 °C en un solo minuto. Los autores recomiendan el uso de membranas de alta reflectancia con recubrimientos interiores de baja emisividad. El estudio aporta criterios técnicos útiles para techumbres industriales ligeras en climas con alta exposición solar.

Rawat y Singh (2021) analizaron el desempeño térmico de un sistema cool roof en una losa de concreto en Indore (clima compuesto). Con un recubrimiento de albedo 0.88, se logró reducir la temperatura interior en 2.4 °C, la cara interna del techo en 4.1 °C y la externa en 9.2 °C, respecto a una losa sin intervención. La solución destaca por su sencillez y bajo costo, siendo técnicamente viable en edificaciones industriales masivas con cubiertas expuestas. Aunque el experimento se realizó en una celda pequeña, los resultados son relevantes para climas cálido secos.

Crespo Sánchez y Masip Vilà (2022) realizaron simulaciones de recubrimientos termocrómicos en edificios industriales ligeros de Barcelona y Madrid. Se analizaron escenarios con cambio de color mensual y diario, partiendo

de acabados extremos (blanco y negro). Los ahorros energéticos oscilaron entre 1 % y 12 % anuales, siendo mayores en envolventes de alta transmitancia. El análisis identificó temperaturas óptimas de transición superficial entre 25 °C y 30 °C. El estudio resulta útil para procesos de rehabilitación en cubiertas poco aisladas, especialmente si se prioriza el control radiativo en zonas de alta radiación.

Banti et al. (2023) evaluaron fachadas verdes en una nave industrial en Toscana. La vegetación redujo la temperatura superficial exterior hasta en 8 °C y la interior en 0.87 °C, con disminuciones del 14 % al 38 % en el consumo energético por refrigeración, según la geometría y escala del edificio. En zonas áridas como Mexicali, su aplicación exige vegetación caducifolia y diseño estacional que evite penalizaciones térmicas durante el invierno. El estudio refuerza la importancia del porcentaje de acristalamiento y la forma edilicia en la eficacia de soluciones vegetales.

Alhuwayil et al. (2023) compararon aislamiento y sombreado horizontal en un edificio multiespacial modelado en varios climas, incluyendo Jeddah y Khamis Mushait (BWh). El sombreado logró un ahorro energético de hasta 65.2 %, mientras que el aislamiento térmico fue menos efectivo, e incluso adverso en algunos casos. La introducción de un índice comparativo evidenció que, en climas áridos, el control solar pasivo tiene mayor impacto que la resistencia térmica convencional, especialmente en edificaciones de baja inercia. El estudio ofrece una base cuantitativa sólida para priorizar estrategias de protección solar en climas cálido secos.

La Tabla 3, sintetiza los estudios revisados en este apartado, se identifican las estrategias específicas aplicadas, los resultados térmicos más relevantes, la categoría pasiva correspondiente y las condiciones de aplicación técnica en edificaciones industriales ubicadas en climas cálido seco extremo.

Tabla 3. Estrategias de protección solar y térmica en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
Hu (2018)	Sombreado fijo + ventilación controlada	Reducción mensual: -8,959.7 kWh; ahorro anual: 120,841.5 RMB (iluminación)	Protección solar y térmica	Climas húmedos; adaptable a secos con control de ventilación
Vinod Kumar et al. (2021)	Cubierta doble piel: EPS (50 mm) + aluminio reflectante (albedo 0.90) + canal ventilado	ΔT interior: -4.7 °C; ΔT superficial: -11.11 °C	Protección solar y térmica	Climas cálido-secos; techos metálicos expuestos
Tian et al. (2021)	Selección de membranas con propiedades ópticas	Ganancia solar: 225.8 kW; ΔT instantánea: 5.5 °C en 1 min	Protección solar y térmica	Zonas con alta radiación en cubiertas ligeras
Rawat & Singh (2021)	Pintura reflectante (albedo 0.88) sobre losa de concreto	ΔT interior: -2.4 °C; superficie interior: -4.1 °C; exterior: -9.2 °C	Protección solar y térmica	Techos masivos en climas cálido-secos o mixtos
Crespo Sánchez & Masip Vilà (2022)	Recubrimiento termocrómico con reflectancia variable	Ahorro energético anual: 1 % a 12 %; máximo con $U = 1.2 \text{ W/m}^2\text{-K}$	Protección solar y térmica	Climas cálidos; rehabilitación de envolventes poco aisladas
Banti et al. (2023)	Fachadas verdes en muros norte, sur y oeste	ΔT s ext.: -8 °C; ΔT int.: -0.87 °C; ahorro: hasta 38 % en refrigeración	Protección solar y térmica	Zonas áridas con vegetación adaptable y control estacional
Alhuwayil et al. (2023)	Sombreamiento horizontal vs aislamiento térmico	Ahorro: +65.2 % (sombra); pérdida: -11.6 % (aislamiento) en BWh	Protección solar y térmica	Regiones áridas; techumbres expuestas sin aislante previo

Nota: Elaboración propia (2023). ΔT : diferencia de temperatura; ΔT s ext.: diferencia de temperatura superficial exterior; EPS: poliestireno expandido; albedo: fracción de radiación solar reflejada por una superficie; U : coeficiente de transmitancia térmica.

Los estudios analizados confirman que la protección solar y térmica representa una estrategia eficaz para reducir la carga térmica en edificaciones industriales con alta exposición solar. La elección del tipo de sombreadamiento, el acabado superficial y la configuración constructiva debe responder a las particularidades del clima y de la envolvente. En zonas áridas como Mexicali, donde predominan techumbres ligeras sin aislamiento y muros con baja inercia térmica, estas soluciones ofrecen un alto potencial de mejora cuando se integran de forma coherente al diseño arquitectónico. El apartado siguiente examina las estrategias de amortiguamiento térmico, centradas en aumentar la capacidad de almacenamiento de calor y estabilizar las temperaturas interiores frente a las oscilaciones térmicas extremas.

1.3.3.2. Amortiguamiento térmico.

Este apartado analiza los principales estudios sobre el amortiguamiento térmico como estrategia pasiva en edificios industriales. Esta técnica busca reducir la variación térmica interior mediante la masa térmica de los materiales, el uso de materiales de cambio de fase (PCM) o la optimización de los sistemas de aislamiento. Su efectividad depende del comportamiento dinámico de la envolvente y de la magnitud de las oscilaciones térmicas diarias, especialmente en regiones con alta exposición solar.

Vytchikov et al. (2020) desarrollaron un modelo analítico para determinar el espesor óptimo de aislamiento en paneles sándwich empleados en edificios industriales con calefacción intermitente. El estudio, aplicado a clima continental frío (Dfb), propuso un método para estimar el tiempo de calentamiento necesario al inicio de la jornada laboral, en función del espesor de lana mineral. El rango óptimo identificado fue de 70 a 80 mm, suficiente para mantener el confort térmico con baja demanda energética. Si bien el régimen de uso difiere del contexto de Mexicali, el enfoque resulta transferible en cuanto a la relación entre masa térmica y velocidad de respuesta de la envolvente.

Li et al. (2020) realizaron una simulación numérica bidimensional para evaluar paneles industriales con aislamiento de EPS en espesores de 2, 4 y 6 cm. El modelo fue aplicado en cuatro ciudades chinas con climas contrastantes, reveló que, en invierno, el espesor de 6 cm reduce la carga térmica en hasta 150 MJ por temporada. En verano, las diferencias por espesor fueron marginales, aunque destacaron los efectos regionales. El análisis identificó la pérdida de eficiencia térmica en las uniones entre paneles, se reforzó la necesidad de un diseño constructivo continuo. Aunque no se abordó el confort térmico interior, el estudio ofrece parámetros útiles para diseñar soluciones pasivas con mejor inercia térmica en muros industriales.

Dervishi y Karamani (2020) analizaron una planta industrial ligera sin climatización activa en Albania (Csa). Mediante simulación con DesignBuilder®, evaluaron dos escenarios de mejora en la envolvente. El primero consideró el aumento del espesor aislante; el segundo sumó ventilación pasiva en cubierta. El ahorro energético anual osciló entre 10 % y 16 %, con una reducción máxima interior de 1.5 °C. Aunque el clima mediterráneo es menos severo que el de Mexicali, los resultados confirman que el aislamiento térmico puede mejorar el desempeño energético en edificios industriales sin necesidad de sistemas activos.

Mano y Thongtha (2021) realizaron un experimento a escala con techumbres metálicas que incorporaban PCM de parafina con diferentes puntos de fusión. El estudio demostró una reducción térmica interior de hasta 2.8 % y un aumento del 62.5 % en el tiempo requerido para alcanzar la temperatura máxima. El decremento térmico también mejoró, se alcanzaron valores de hasta 44.2 %. Estos resultados confirman que el PCM puede retardar el flujo de calor en techos ligeros, siempre que se seleccione un punto de fusión adecuado al perfil térmico del sitio.

Boobalakrishnan et al. (2021) desarrollaron un modelo experimental en Coimbatore (Aw) con PCM aplicado bajo cubierta metálica. Las reducciones térmicas fueron de 9.5 °C en el interior, 7.5 °C en la cara exterior y 5.5 °C en el plafón. Posteriormente, Rinawa et al. (2022) mejoraron esta configuración añadiendo nanopartículas de sílice al PCM, generaron un material denominado

NDCW. Esta modificación permitió reducciones adicionales de hasta 3 °C y mejoró el rendimiento térmico diario. Ambos estudios confirman la viabilidad del PCM como estrategia de amortiguamiento en techumbres sin aislamiento, particularmente en climas con alta radiación solar.

Zhukov et al. (2022) propusieron un sistema de aislamiento continuo con espuma de polietileno modificada, diseñado para elementos en contacto con el terreno. El material, fabricado con polietileno reciclado y retardantes de llama, alcanzó una conductividad térmica de 0.032–0.034 W/m·K y una resistencia térmica superior a 2.8 (m²·°C)/W. La instalación, sin puentes térmicos, fue validada mediante monitoreo en campo. Aunque el estudio no reporta reducciones térmicas directas, sus propiedades técnicas lo posicionan como una alternativa efectiva para estabilizar temperaturas en zonas de contacto con el subsuelo, incluso en climas extremos.

La Tabla 4, presenta una síntesis técnica de los estudios analizados en este apartado. Se incluyen las estrategias de amortiguamiento térmico evaluadas, los principales resultados reportados, la categoría pasiva correspondiente y las condiciones en las que cada intervención podría resultar viable en edificios industriales expuestos a climas cálido seco extremo.

Tabla 4. Estrategias de amortiguamiento térmico en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
Vytchikov et al. (2020)	Panel sándwich con lana mineral (70–80 mm) para calefacción intermitente	Tiempo de calentamiento < 4 h; cumplimiento normativo con 70–80 mm	Amortiguamiento térmico	Climas fríos con uso intermitente y fachadas ligeras
Li et al. (2020)	Panel prefabricado con EPS (2–6 cm); análisis con y sin puente térmico	Reducción: hasta 150 MJ en invierno; ΔE diaria < 0.01 MJ/m ² en verano	Amortiguamiento térmico	Cálido-secos si se eliminan puentes térmicos en muros

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
Dervishi & Karamani (2020)	Aislamiento en muros (80 mm) y techo (40 mm) + tragaluces ventilados	ΔT verano: – 1.5 °C; ahorro energético: 10–16 % anual (S1–S2)	Amortiguamiento térmico	Zonas cálidas sin climatización activa
Boobalakashnan et al. (2021)	PCM de parafina (45 °C) encapsulado bajo cubierta metálica (escala 1:50)	ΔT interior: – 9.5 °C; cubierta ext.: –7.5 °C; plafón: –5.5 °C; media diaria: – 5 °C	Amortiguamiento térmico	Climas áridos con techumbres metálicas expuestas
Mano & Thongtha (2021)	Cubierta metálica con PCM (I–IV) encapsulado; análisis de retardo térmico	ΔT interior: – 2.8 %; retardo térmico: +62.5 %; decremento térmico: +3.7 %	Amortiguamiento térmico	Regiones cálido-secas con alta radiación y techumbres ligeras
Zhukov et al. (2022)	Espuma de polietileno modificada; sistema continuo sin puentes térmicos	λ : 0.032–0.034 W/m·K; R: 2.86–3.20 (m ² ·°C)/W; deformación < 1 % bajo carga	Amortiguamiento térmico	Climas extremos en elementos en contacto con el suelo
Rinawa et al. (2022)	PCM con nano-sílice (NDCW, 1 % vol.) bajo cubierta metálica	ΔT interior: – 12.5 °C; cubierta ext.: –10 °C; plafón: –6.5 °C; media diaria: – 6 °C	Amortiguamiento térmico	Cálido-secos con techos metálicos; alta eficiencia térmica

Nota: Elaboración propia (2023). ΔT : diferencia de temperatura; ΔE : variación diaria de energía acumulada; EPS: poliestireno expandido; PCM: material de cambio de fase; λ : conductividad térmica; R: resistencia térmica; % vol.: porcentaje en volumen.

Los estudios revisados demuestran que el amortiguamiento térmico puede mejorar de manera significativa la estabilidad térmica interior en edificios industriales. Su efectividad depende del espesor, continuidad y conductividad de los materiales utilizados, así como de su adecuación al perfil térmico del sitio. Las soluciones que integran PCM, aislamiento multicapa o sistemas sin puentes térmicos resultan especialmente útiles en edificaciones ligeras o sin climatización

activa. El apartado siguiente examina las estrategias de disipación de calor, centradas en facilitar la expulsión eficiente del calor acumulado en la envolvente.

1.3.3.3. Disipación de calor.

Este apartado examina de forma crítica las estrategias pasivas orientadas a la expulsión de calor acumulado en edificaciones industriales. En climas cálidos-secos extremos, donde predominan techumbres ligeras sin aislamiento y una marcada amplitud térmica diaria, la disipación de calor representa una necesidad prioritaria para mantener condiciones operativas tolerables sin recurrir a sistemas mecánicos.

Amatalraof et al. (2019) desarrollaron un sistema de enfriamiento inspirado en los mecanismos biológicos de intercambio térmico del camello, aplicado en una torre de viento experimental en Seiyun, Yemen (BWh). El dispositivo empleó cilindros de arcilla cubiertos con yute húmedo, dispuestos verticalmente en una estructura de 1.2 m de altura. La ventilación cruzada inducida por viento forzó el paso del aire caliente a través de estas superficies, se generó una reducción térmica promedio de 14.6 °C, con máximos de hasta 19.8 °C. La humedad relativa del aire ascendió hasta 70.6 %, sin requerir energía externa. Su bajo costo, modularidad y eficiencia lo convierten en una estrategia replicable para edificaciones de uno o más niveles, especialmente en entornos con acceso limitado a climatización activa.

Lyu et al. (2019) evaluaron un recubrimiento de polidimetilsiloxano (PDMS) sobre lámina metálica como técnica de enfriamiento radiativo pasivo. El sistema reflejó el 96 % de la radiación solar y emitió el 98.6 % de su calor en el rango infrarrojo medio. Bajo condiciones reales en Thuwal (Arabia Saudita), logró mantener su temperatura hasta 5 °C por debajo del ambiente. La tasa de disipación alcanzó 122.6 W/m². Aunque su desempeño se reduce en presencia de humedad atmosférica, la tecnología demuestra viabilidad en techumbres metálicas expuestas de regiones áridas.

Othman et al. (2020) propusieron un modelo de configuración urbana pasiva para parques empresariales en Egipto (BWh). Simulaciones en ENVI-met indicaron que aumentar la relación altura/anchura del espacio urbano ($H/W \geq 1.5$), orientar la traza norte-sur y elevar la vegetación al 25 % reduce la temperatura media radiante (MRT) en hasta $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el índice UTCI en $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. La mejora térmica fue más notable en escenarios con sombra y vegetación densa. Aunque el estudio se enfoca en espacios exteriores, sus implicaciones sobre el entorno inmediato justifican su inclusión como estrategia de disipación indirecta con efecto positivo en el desempeño térmico de los edificios colindantes.

Kaboré et al. (2020) compararon cubiertas verdes y cubiertas humedecidas en un edificio de 1296 m^2 , bajo condiciones actuales y proyectadas (año 2080). Simulaciones en TRNSYS mostraron que, en Marsella (Csa), el riego artificial en cubiertas verdes elevó su eficacia exterior (η_{FRout}) hasta 110 % y su eficiencia interior (η_{FRin}) a 24.3 %. Las cubiertas humedecidas lograron una reducción del efecto isla de calor en un 93.4 %. Sin embargo, la dependencia de humedad constante limita su aplicabilidad directa. En climas áridos, su viabilidad técnica queda supeditada al acceso hídrico y a la capacidad de mantenimiento del sistema.

Chen et al. (2021) desarrollaron un modelo validado para evaluar recubrimientos reflectivos avanzados sobre techos industriales. El sistema alcanzó reducciones de hasta $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la superficie y ahorros energéticos entre 97.4 y $136.4\text{ kWh/m}^2\cdot\text{año}$ en cubiertas metálicas. El efecto disipador fue más pronunciado en techos sin aislamiento, mientras que la humedad atmosférica alta disminuyó su rendimiento. La evidencia respalda su aplicación en contextos áridos con techos expuestos, donde la ventana atmosférica permanece funcional y la masa térmica es reducida.

Katona (2022) propuso un diseño optimizado de torres de ventilación pasiva para naves industriales. Simulaciones CFD y validaciones empíricas mostraron tasas de renovación de aire de hasta 8.72 h^{-1} . Variantes geométricas como formas parabólicas o configuraciones tipo Venturi incrementaron el flujo hasta en 544 %. El estudio introdujo un algoritmo de síntesis de diseño (EDS), que reduce el costo

computacional en etapas tempranas del proyecto. Su enfoque sistemático y adaptable lo convierte en una referencia clave para climas cálido-secos, donde la ventilación natural eficiente es crítica y las soluciones deben integrarse a edificios de gran escala sin penalizar el espacio útil.

Krishnan et al. (2023) integraron una torre de viento pasiva con un sistema solar de calentamiento (SHU) para operar en invierno sin sacrificar el rendimiento en verano. En condiciones experimentales, el sistema alcanzó 25 renovaciones por hora (ACR) y un ACE de hasta 2.13. Aunque concebido para climas con inviernos marcados, su capacidad de adaptación automática mediante sensores permite su uso estacional. En climas cálido-secos, su configuración sin módulo térmico actúa como torre de ventilación convencional, con ventajas adicionales en presión y mezcla de aire. Esta flexibilidad funcional favorece su implementación en zonas industriales con alta carga térmica.

Bach et al. (2023) analizaron cuatro estrategias pasivas en la cubierta de una fábrica textil en Bangladesh: cubierta verde, sombreado horizontal, recubrimiento blanco y blanco con aislamiento PIR. Las simulaciones mostraron reducciones de temperatura operativa de hasta 1.9 °C y una disminución de 603 horas anuales por encima de WBGT 30 °C. El sistema de sombreado logró el mayor impacto (-62 %), aunque las diferencias entre estrategias fueron estadísticamente menores. En climas áridos, los recubrimientos blancos con aislamiento ofrecen un balance favorable entre eficiencia térmica, bajo mantenimiento y adaptabilidad estructural.

La Tabla 5, presenta una síntesis técnica de los estudios revisados en este apartado, clasifica las estrategias de disipación de calor, los principales resultados térmicos obtenidos, la categoría funcional correspondiente y las condiciones de aplicación en edificaciones industriales situadas en climas cálido seco extremo.

Tabla 5. Estrategias de disipación de calor en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
--------------------	------------------------	--------------------------------	------------------	------------------------------

Amatalraof et al. (2019)	Enfriamiento evaporativo con yute húmedo y arcilla en torre de viento (1.2 m)	ΔT promedio: $-14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; ΔT máx: $-19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; humedad: hasta $+70.6\%$	Disipación de calor	Regiones áridas con baja humedad y ventilación cruzada disponible
Lyu et al. (2019)	Revestimiento de PDMS sobre lámina metálica con guía cónica	Reducción: hasta $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vs ambiente; enfriamiento: 122.6 W/m^2	Disipación de calor	Techumbres metálicas con exposición solar directa
Othman et al. (2020)	$H/W \geq 1.5$, orientación N-S, albedo medio y vegetación $\geq 25\%$	ΔMRT : hasta $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta UTCI$: hasta $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$; ΔT_a : -2 a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	Disipación de calor	Parques industriales áridos
Kaboré et al. (2020)	Cubierta verde con sustrato húmedo / cubierta humedecida permanente	ΔT (ηFR_{out}): hasta $+110\%$; confort interior (ηFR_{in}): hasta $+25.1\%$	Disipación de calor	Regiones secas con posibilidad de riego permanente
Chen et al. (2021)	Recubrimiento polimérico poroso sobre lámina metálica (98% R, 97% ϵ)	Reducción superficial: hasta $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; ahorro: $136.4\text{ kWh/m}^2\cdot\text{año}$	Disipación de calor	Climas áridos con alta radiación; limitada en regiones húmedas
Katona (2022)	Torres UD, DD y coaxial; geometría optimizada (parabólica, Venturi)	ACH: $2.37\text{--}8.72\text{ h}^{-1}$; mejora del flujo: $+25\text{--}544\%$ según configuración	Disipación de calor	Naves industriales en zonas cálidas con posibilidad de ventilación forzada pasiva
Krishnan et al. (2023)	Torre de viento multidireccional con unidad solar de calentamiento (SHU) integrada	ΔT aire entrante: $+7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; ACH $\approx 25\text{ h}^{-1}$; ACE: hasta 2.13	Disipación de calor	Cálido-secos sin calefacción activa; viable como sistema híbrido
Bach et al. (2023)	Cubierta verde, cubierta sombreada, recubrimiento blanco, blanco con aislamiento	ΔT operativa: $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; -603 h/año $> WBGT 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; -62% exposición crítica	Disipación de calor	Climas cálido-secos; mayor eficacia con sombreado estructural y aislamiento

Nota: ΔT : diferencia de temperatura; MRT: temperatura media radiante; UTCI: índice de temperatura equivalente universal; T_a : temperatura del aire; R: reflectancia solar; ϵ : emisividad térmica; ηFR_{out} / ηFR_{in} : eficiencia de enfriamiento radiativo en exterior/interior;

ACH: air changes per hour (renovaciones de aire por hora); ACE: air change effectiveness (efectividad de renovación de aire). Elaboración propia (2023).

Las evidencias reunidas en este apartado confirman que las estrategias de disipación de calor constituyen un componente esencial del diseño pasivo en edificios industriales localizados en entornos de alta radiación solar y amplitud térmica marcada. Su efectividad depende no solo del principio físico que las sustenta, sino también de su integración con la geometría arquitectónica, la disponibilidad hídrica y las condiciones atmosféricas locales. Frente a la limitada inercia térmica de las cubiertas industriales, estas soluciones representan alternativas viables para mitigar el sobrecalentamiento sin recurrir a sistemas activos, siempre que se consideren los requerimientos técnicos y de mantenimiento asociados a cada configuración.

1.3.3.4. Estrategias combinadas

Las estrategias combinadas integran dos o más mecanismos pasivos — protección solar, amortiguamiento térmico y disipación de calor— para optimizar el comportamiento térmico de los edificios industriales. A diferencia de las soluciones aisladas, estas intervenciones buscan efectos sinérgicos que permitan mejorar simultáneamente el aislamiento, la reflectancia y la ventilación, adaptándose a contextos con altas exigencias térmicas, como los climas cálido-secos extremos. La literatura reciente presenta estudios relevantes que confirman la eficacia de estas combinaciones en la rehabilitación energética de naves industriales.

Yew et al. (2018) evaluaron experimentalmente un sistema pasivo aplicado en techos metálicos, combinaron un recubrimiento reflectante (TRC) con una cámara de aire tipo MAC. En condiciones simuladas del clima de Malasia (Af), el modelo con TRC (SRI 120) logró reducir en 5 °C la temperatura superficial exterior, mientras que al incorporar la cámara MAC, la reducción alcanzó los 6.3 °C en la superficie y 12.2 °C en el ático. La intervención demostró eficacia sin requerir

sistemas activos, con potencial de replicabilidad en techumbres metálicas expuestas a alta radiación, como las de Mexicali.

Slavković (2019) desarrolló un análisis comparativo en un edificio industrial con cubierta tipo shed, aplicó combinaciones de sombreado fijo, doble fachada ventilada y ventilación nocturna. Si bien el uso de vidrio de baja emisividad redujo la carga de refrigeración en un 43.01 %, también aumentó en 55.50 % la demanda de calefacción. En cambio, la configuración basada en vidrio kopilit original, combinada con estrategias pasivas, ofreció un equilibrio térmico más robusto. Este estudio destaca por su enfoque integrador y su capacidad para mostrar compensaciones energéticas según la temporada.

La Roche et al. (2020) propusieron un sistema híbrido que combina cubierta verde, ventilación nocturna y enfriamiento evaporativo mediante tuberías embebidas en el sustrato vegetal. Los ensayos demostraron reducciones interiores de 9 a 13 °C frente al exterior y mejoras de hasta 2.1 °C respecto a techos verdes convencionales. El número de horas de confort aumentó en un 13 %. La efectividad del sistema depende del control hídrico del sustrato, pero su diseño modular y la validación empírica lo hacen viable para techumbres industriales sin aislamiento previo.

Espino-Reyes et al. (2020) simulon escenarios pasivos en edificios industriales de 10,000 m² en distintas ciudades mexicanas. En Monterrey, la combinación de EPS en cubierta más recubrimiento reflectante redujo la carga térmica anual en 31.3 %, y en Torreón, la mezcla de lana mineral con cool roof logró una reducción del 28.2 %. La investigación valida que la integración de aislamiento térmico con control solar ofrece mejoras térmicas superiores a las estrategias aplicadas de forma aislada.

Ergün y Bekleyen (2024) desarrollaron una taxonomía técnica de estrategias tradicionales pasivas, identificaron 55 técnicas en 41 países cálido-secos. Más del 48 % de las estrategias identificadas operan por mecanismos combinados de protección solar y disipación, lo que refuerza su aplicabilidad en rehabilitaciones

contemporáneas. Aunque el estudio no incluye simulaciones, ofrece un marco clasificatorio útil para el diseño pasivo adaptado a edificios industriales.

Yaman (2025) empleó un modelo ANN–PSO para optimizar parámetros pasivos en edificios industriales en cinco zonas climáticas. En contextos áridos, la forma compacta, la orientación adecuada, una relación ventana-muro del 40–60 % y vidrios de baja emisividad ofrecieron los mejores resultados, superando estrategias aisladas. El enfoque computacional permite seleccionar configuraciones arquitectónicas óptimas desde etapas tempranas del diseño.

La Tabla 6, presenta una síntesis técnica de los estudios analizados en este apartado. Se detallan las estrategias combinadas evaluadas, los resultados térmicos principales, la categoría estratégica correspondiente y la valoración de su aplicabilidad en edificios industriales localizados en climas cálido seco extremo.

Tabla 6. Estrategias combinadas en edificios industriales: síntesis técnica de estudios revisados.

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
Yew et al. (2018)	Recubrimiento TRC (SRI 120) + cámara de aire tipo MAC	ΔT en cubierta: –6.3 °C; en ático: –12.2 °C	Estrategias combinadas (protección + disipación)	Techumbres metálicas expuestas en climas cálido-húmedos y cálido-secos
Slavković (2019)	Vidrio sustituto + doble fachada ventilada + ventilación nocturna + sombreado fijo	–43 % en refrigeración; +55.5 % en calefacción	Estrategias combinadas (protección solar y térmica + disipación)	Zonas con inviernos fríos y veranos cálidos; envolventes mixtas
La Roche et al. (2020)	Cubierta verde + ventilación nocturna + evaporación radiativa	ΔT máx: –13 °C vs exterior; –2.1 °C vs cubierta verde estándar	Estrategias combinadas (amortiguamiento + disipación)	Climas áridos con disponibilidad de humedad y control de ventilación
Espino-Reyes et al. (2020)	Aislamiento en cubierta (EPS o	Reducción de carga térmica	Estrategias combinadas	Cálido-secos con techos sin

Autor(es) y año	Estrategia aplicada	Resultado térmico principal	Categoría EEP	Condiciones de aplicación
	lana mineral) + cool roof	anual: hasta 31.3 % (BSh); 28.2 % (BWh)	(protección solar y térmica + amortiguamiento)	aislamiento previo
Ergün y Bekleyen (2024)	Sombreado, ventilación natural y masa térmica en arquitectura tradicional	Ventilación: 59.3 %; sombreado: 57.5 %; aislamiento: 46.3 %	Estrategias combinadas (protección + disipación)	Regiones áridas con tipología vernácula adaptable
Yaman (2025)	Geometría compacta, orientación solar, optimización de WWR y vidrio de baja emisividad	Reducción de carga térmica total: hasta 16 % (ANN-PSO)	Estrategias combinadas (protección + amortiguamiento + disipación)	Climas áridos con diseño arquitectónico optimizado por simulación

Nota: ΔT : diferencia de temperatura; SRI: índice de reflectancia solar; MAC: módulo de aire controlado; EPS: poliestireno expandido; BSh/BWh: climas semiárido y desértico cálido, según Köppen-Geiger; WWR: window-to-wall ratio (relación ventana-muro); ANN-PSO: optimización por redes neuronales artificiales y algoritmo de enjambre de partículas. Elaboración propia (2025).

Los estudios revisados confirman que la aplicación de estrategias combinadas representa un enfoque eficaz y técnicamente robusto para optimizar el comportamiento térmico de edificios industriales en condiciones extremas. La integración de mecanismos pasivos como sombreado, aislamiento, ventilación natural y masa térmica genera efectos sinérgicos que superan los beneficios de las soluciones aisladas, siempre que se adapten al contexto operativo y climático específico. La evidencia disponible sustenta su implementación en climas cálido secos extremos, como el de Mexicali, donde la simultaneidad de cargas internas elevadas y condiciones exteriores adversas exige un enfoque de rehabilitación energética de carácter integral.

1.3.2. Resultados de la revisión de literatura

La revisión técnica realizada a treinta estudios permitió establecer patrones comunes en la aplicación de estrategias de enfriamiento pasivo en edificios

industriales, con base en sus resultados térmicos y condiciones climáticas de implementación. Si bien la literatura abarca un amplio espectro de ubicaciones y tipologías, los estudios desarrollados en regiones con clima desértico cálido (BWh), análogos a Mexicali, ofrecen los aportes más relevantes para entornos de alta demanda térmica y baja inercia constructiva.

Las estrategias de protección solar y térmica destacan por su capacidad para interceptar la radiación solar directa y limitar la ganancia térmica en la envolvente. Soluciones como sombreados fijos, cubiertas reflectantes y fachadas ventiladas han demostrado reducciones operativas consistentes, especialmente en edificaciones con techumbres expuestas y orientación crítica.

El amortiguamiento térmico, mediante materiales de alta capacidad térmica como los PCM resulta útil para moderar las variaciones de temperatura interior, aunque su desempeño está condicionado por la amplitud térmica diaria y las propiedades constructivas del sistema envolvente. La viabilidad de estas estrategias, en particular en zonas cálido-secas, requiere un análisis técnico-económico riguroso debido al costo de los materiales especializados.

Las estrategias de disipación de calor, como la ventilación cruzada, el enfriamiento por radiación nocturna o la incorporación de cubiertas vegetales, han mostrado resultados efectivos en climas con oscilaciones térmicas amplias. Su implementación en edificios industriales requiere adaptar las soluciones a escalas mayores y condiciones de operación continua, lo cual representa una oportunidad aún poco explorada.

Los hallazgos revisados confirman que ningún enfoque aislado resuelve por sí mismo las demandas térmicas de estos entornos. La eficacia global depende de la integración estratégica de las distintas técnicas, atendiendo al clima local, a las características térmicas de la envolvente y a la lógica operativa del edificio. Estos resultados consolidan el fundamento técnico necesario para plantear intervenciones específicas en el contexto de la rehabilitación energética industrial en climas extremos.

1.3.3. Discusión y conclusiones de la revisión de literatura

A lo largo de este capítulo se analizaron críticamente treinta estudios recientes sobre estrategias de enfriamiento pasivo en edificios industriales, con énfasis en su desempeño térmico en distintos contextos climáticos. Esta revisión permitió clasificar las técnicas en tres enfoques funcionales: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico, y disipación de calor, conforme a su incidencia sobre el balance energético de la envolvente arquitectónica. Esta estructura fue guiada por postulados teóricos consolidados (Givoni, 1976; Szokolay, 2014; Olgay, 2015), pero aplicada bajo criterios comparativos propios del contexto cálido seco extremoso.

Los resultados indican que la protección solar a través de sombreados, materiales reflectantes y envolventes ventiladas, es fundamental en regiones con radiación solar intensa, como el caso de Mexicali. Sin embargo, en condiciones de elevada amplitud térmica diaria, las estrategias de amortiguamiento y disipación adquieren un papel complementario indispensable, especialmente cuando se integran de forma coordinada.

La literatura revisada muestra que la mayoría de las investigaciones han sido desarrolladas mediante simulaciones numéricas, sin validación empírica en entornos reales. Esta limitación metodológica se vuelve crítica en climas como el BWh, donde las condiciones extremas no siempre se reproducen con fidelidad en modelos teóricos. Asimismo, persisten vacíos en la evaluación de soluciones adaptadas a edificios industriales existentes, cuyas tipologías constructivas difieren significativamente de la vivienda o el sector terciario, comúnmente estudiados.

En conjunto, el estado del arte confirma el potencial técnico de las estrategias pasivas, pero también revela la necesidad de investigaciones aplicadas que respondan a condiciones reales, con validación instrumental, sensibilidad climática y criterios de intervención adaptativa. Este panorama establece los fundamentos necesarios para el desarrollo de un estudio enfocado en la rehabilitación energética de edificios industriales en zonas áridas, donde la eficiencia operativa aún representan un reto por la literatura especializada

1.4. Preguntas de investigación e hipótesis

En este apartado se formulan la pregunta de investigación principal, las preguntas secundarias derivadas y la hipótesis que orienta la validación del presente trabajo. Estos elementos definen el problema específico a resolver, así como el enfoque comparativo que estructura el desarrollo metodológico de la investigación.

1.4.1. Pregunta de investigación

¿Cuál es el efecto térmico de técnicas de enfriamiento pasivo en la rehabilitación energética de edificios industriales en clima cálido seco extremo ubicados en Mexicali, Baja California?

1.4.2. Preguntas de investigación secundarias

1. ¿Qué parámetros del clima cálido seco extremo de Mexicali son relevantes para definir un diagnóstico bioclimático en el diseño pasivo de edificios industriales?
2. ¿Qué características constructivas, funcionales y operativas presenta el edificio industrial seleccionado que lo hacen representativo para evaluar el efecto de estrategias pasivas de enfriamiento?
3. ¿Cómo varía el comportamiento térmico del edificio industrial al aplicar distintas técnicas de enfriamiento pasivo mediante modelado digital y simulación dinámica validada con monitoreo térmico?
4. ¿Qué diferencias térmicas se observan en los componentes de la envolvente arquitectónica al comparar técnicas pasivas específicas bajo condiciones de simulación equivalentes?
5. ¿Qué técnica pasiva de enfriamiento ofrece el mayor beneficio térmico en términos de reducción de temperatura operativa interior y eficiencia energética en el contexto del caso de estudio?

1.4.3. Hipótesis

La aplicación de técnicas de enfriamiento pasivo en la envolvente arquitectónica de edificios industriales en Mexicali reduce significativamente la temperatura operativa interior y mejora el desempeño térmico general, contribuyendo a una rehabilitación energética efectiva en condiciones de clima cálido seco extremo.

1.5. Objetivos de investigación

En este apartado se establecen los objetivos que orientan el desarrollo metodológico de la investigación. El objetivo general define el propósito central del trabajo, mientras que los objetivos específicos desglosan las etapas sucesivas de análisis climático, caracterización del caso de estudio, instrumentación térmica, modelado digital validado, configuración de escenarios y evaluación comparativa del efecto térmico de técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas sobre la envolvente.

1.5.1 Objetivo general

Analizar el efecto térmico de distintas técnicas de enfriamiento pasivo aplicadas a la envolvente arquitectónica de un edificio industrial representativo en Mexicali, B.C., con el fin de evaluar su impacto en el desempeño térmico como estrategia de rehabilitación energética en clima cálido seco extremo.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar las condiciones climáticas locales de Mexicali para establecer un diagnóstico bioclimático que fundamente la selección de estrategias pasivas de enfriamiento en edificaciones industriales.
- Seleccionar y caracterizar un edificio industrial que actúe como caso de estudio, con base en sus condiciones materiales, geométricas y de uso, para fundamentar su evaluación térmica.
- Desarrollar, calibrar y validar un modelo digital del edificio industrial, incorporando sus características físicas y ocupacionales, para simular escenarios térmicos con distintas estrategias pasivas y evaluar su impacto sobre el comportamiento térmico interior.
- Diseñar e implementar escenarios comparativos de intervención sobre la envolvente del edificio industrial, mediante técnicas pasivas seleccionadas, para comparar su comportamiento térmico.

- Comparar cuantitativamente los resultados obtenidos en cada escenario simulado, con el fin de identificar la técnica de enfriamiento pasivo más efectiva para reducir la temperatura operativa interior y mejorar el desempeño térmico del edificio industrial.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Este capítulo desarrolla el marco teórico y conceptual de la rehabilitación energética en edificios industriales en clima cálido seco extremo, con énfasis en la implementación de técnicas de enfriamiento pasivo. Estas estrategias resultan esenciales para optimizar el rendimiento energético de las edificaciones, reducir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización y asegurar condiciones de confort térmico.

Se presenta el concepto de eficiencia energética aplicado a las edificaciones industriales, con un análisis de su relevancia en términos económicos y ambientales. También se abordan los desafíos específicos que enfrentan los edificios industriales en climas cálidos secos, y cómo la rehabilitación energética ofrece una solución viable y eficiente.

Además, se exploran las estrategias bioclimáticas como principios fundamentales para alcanzar una mayor eficiencia energética. La optimización de la envolvente arquitectónica se examina en detalle, se consideran las estructuras opacas y traslúcidas, así como las estrategias pasivas, activas e híbridas que permiten controlar de manera eficiente el flujo térmico.

Asimismo, se revisan las metodologías empleadas para evaluar el desempeño térmico de la envolvente arquitectónica, tanto desde un enfoque experimental como numérico. La revisión de la normatividad vigente asegura el cumplimiento de los estándares energéticos en el diseño y operación de los edificios industriales.

Finalmente, se realiza un análisis de costo-beneficio para evaluar los aspectos económicos de la implementación de estas estrategias, se considera el ahorro energético a largo plazo y los beneficios adicionales, como la reducción de emisiones y la mejora de la imagen corporativa.

Este enfoque facilita la comprensión de las estrategias fundamentales para la rehabilitación energética de edificios industriales en clima cálido seco extremo. Las técnicas de enfriamiento pasivo presentadas abordan los desafíos particulares de estas condiciones y constituyen una base sólida para intervenciones que optimizan el rendimiento energético y promueven la sostenibilidad de las edificaciones.

2.1. Fundamentos de Eficiencia Energética

2.1.1 Principios de la eficiencia energética: Conceptos básicos y definiciones

La eficiencia energética se refiere a la capacidad de un sistema, edificio o tecnología para realizar su función utilizando la menor cantidad posible de energía. Este concepto implica la reducción de las pérdidas de energía y el aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos disponibles, tanto en los sistemas pasivos como en los activos de un edificio (Lechner, 2014). En un contexto de creciente preocupación por la sostenibilidad, la eficiencia energética no solo se enfoca en la reducción del consumo energético, sino también en la mejora del confort térmico y la disminución del impacto ambiental (Perez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008).

Uno de los principios fundamentales que sustenta la eficiencia energética es el concepto de “negavattios”, introducido por Lovins (1977), que se refiere a la energía que se ahorra mediante la implementación de tecnologías más eficientes, evitando así la necesidad de producir energía adicional. Este enfoque resulta esencial en la rehabilitación de edificaciones industriales, donde las mejoras en la envolvente térmica, los sistemas de ventilación y la iluminación pueden generar ahorros energéticos significativos.

El desarrollo de estrategias de eficiencia energética se basa en dos principios clave: la minimización de las pérdidas de energía a través de sistemas pasivos, como el aislamiento térmico, y la optimización del consumo mediante sistemas activos eficientes, como los sistemas HVAC (Allouhi et al., 2015). Ambos enfoques se complementan en el diseño de edificaciones industriales, particularmente en climas cálidos secos, donde la gestión de la energía resulta crucial para mantener el confort interior sin recurrir a un uso intensivo de energía.

Harvey (2013) argumenta que la demanda de servicios energéticos, como la climatización, ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido a la industrialización y el crecimiento de la población. Sin embargo, los avances en la tecnología y el diseño arquitectónico han permitido la creación de edificaciones más eficientes, capaces de cumplir con las crecientes demandas energéticas sin aumentar proporcionalmente el consumo de energía.

Finalmente, la implementación de medidas de eficiencia energética en edificaciones no solo trae beneficios económicos, sino también ambientales, ya que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a la lucha contra el cambio climático. Estas medidas son particularmente relevantes en el contexto de la rehabilitación energética de edificios industriales, donde se pueden lograr ahorros significativos mediante la optimización de los sistemas pasivos y activos (Allouhi et al., 2015).

2.1.2 Factores que influyen en la Eficiencia Energética en Edificaciones:

Envolvente térmica, sistemas HVAC, iluminación natural y artificial.

2.1.3.1 Envolvente térmica

La envolvente arquitectónica, que incluye las paredes, techos, ventanas, y pisos de un edificio, juega un papel crítico en la eficiencia energética. Lechner (2009) subraya que una envolvente bien diseñada puede reducir significativamente la carga de calefacción y enfriamiento de un edificio, lo que resulta en ahorros energéticos significativos. El diseño de la envolvente arquitectónica debe considerar factores como la orientación del edificio, los materiales de construcción, y las condiciones climáticas locales.

2.1.3.1 Envolvente arquitectónica

La envolvente arquitectónica es la barrera física entre el interior y el exterior de un edificio. Kibert (2016) destaca la importancia de la envolvente en la eficiencia energética de un edificio. Un diseño y construcción adecuados pueden minimizar la pérdida o ganancia de calor, y permitir un mejor control del ambiente interior además de disminuir la necesidad de climatización artificial.

2.1.3.1 Envolvente opaca

La envolvente opaca de un edificio incluye elementos como paredes, techos y pisos que no permiten el paso de la luz. Baker (2011) ha indicado que una envolvente opaca bien diseñada puede ayudar a mantener un ambiente interior confortable al minimizar la transferencia de calor entre el interior y el exterior del edificio.

2.1.3.1 Envoltente traslúcida

La envoltente traslúcida de un edificio incluye elementos como ventanas y claraboyas que permiten el paso de la luz. Perez (1983) argumentó que el diseño de la envoltente traslúcida tiene un impacto significativo en la iluminación natural de un edificio y, por tanto, en su eficiencia energética. Al maximizar la luz natural, se puede reducir la necesidad de iluminación artificial y, por lo tanto, el consumo de energía.

2.2. Sistemas Pasivos, Activos e Híbridos de Eficiencia Energética

Este apartado establece el marco técnico de clasificación de las estrategias de eficiencia energética, diferenciando los enfoques pasivos, activos e híbridos según su modo de operación y dependencia tecnológica.

2.2.1 Sistemas Pasivos: Conceptualización y principios.

El diseño pasivo en arquitectura implica la adopción de estrategias que optimizan el confort térmico y la eficiencia energética de las edificaciones sin recurrir a sistemas mecánicos. Estas estrategias se apoyan en la interacción con las condiciones climáticas del entorno para regular la temperatura interior, lo que reduce significativamente la necesidad de energía artificial.

La arquitectura bioclimática, como lo explicó Olgyay (1963), busca integrar los elementos climáticos en el diseño del edificio con el propósito de maximizar el uso de recursos naturales y mejorar la eficiencia energética. Olgyay enfatiza la importancia de considerar factores ambientales, como la radiación solar, el viento, la humedad y la temperatura, al momento de diseñar la disposición arquitectónica y seleccionar materiales.

En climas cálidos y secos, Givoni (1998) subraya la necesidad de limitar la ganancia térmica mediante la protección solar y promover la ventilación para eliminar el calor acumulado. La orientación del edificio y el uso de elementos arquitectónicos que regulen la radiación solar resultan esenciales para optimizar el rendimiento

energético. A su vez, Lechner (2014) destaca que el diseño pasivo no solo busca aprovechar las condiciones naturales, sino también alcanzar un equilibrio óptimo entre la arquitectura y el entorno, al integrar estrategias pasivas con soluciones activas e híbridas que permitan abordar de manera eficaz la reducción de la carga térmica.

El principio de masa térmica, tal como lo describe Yeang (1999), se presenta como una estrategia fundamental en climas extremos, ya que permite regular las fluctuaciones de temperatura al absorber y liberar gradualmente el calor. La masa térmica contribuye a mantener un ambiente interior estable y confortable, aspecto esencial en zonas donde las variaciones de temperatura son significativas.

Santamouris (2019) destaca que la inclusión de paisajismo y vegetación en el entorno inmediato del edificio puede reducir la temperatura ambiente, mitigando el efecto de isla de calor y mejorando el rendimiento térmico general.

2.2.1.1 Principios del Diseño Pasivo

Las estrategias pasivas se orientan a la reducción del consumo energético mediante el uso de recursos naturales y sin necesidad de energía adicional. Estas incluyen el control de la radiación solar, la ventilación natural, el empleo de materiales con alta inercia térmica y el diseño arquitectónico que favorece la captación de energía solar en invierno y su limitación en verano (Lechner, 2014).

La orientación adecuada del edificio y la disposición estratégica de barreras naturales o artificiales que regulen la entrada de viento y radiación solar juegan un papel clave en la eficiencia térmica (Givoni, 1998).

Para maximizar los beneficios de estas estrategias, Lechner (2014) recomienda combinar distintas técnicas que complementen el comportamiento térmico del edificio. La ventilación natural, en conjunto con el uso de masa térmica, contribuye a reducir el consumo energético y a mejorar el confort interior. Además, el empleo de dispositivos de sombreado ajustables optimiza la regulación de la radiación solar a lo largo del año, lo que permite un rendimiento térmico adecuado tanto en verano como en invierno (Givoni, 1998).

2.2.1.1.1 Estrategias Pasivas de Enfriamiento: Protección solar, masa térmica, ventilación natural, y paisajismo.

Las estrategias pasivas de enfriamiento son esenciales en la reducción de la carga térmica en edificios, especialmente en climas cálidos y secos. Estas técnicas permiten aprovechar los recursos naturales para mantener condiciones confortables en el interior de los edificios, minimizando la dependencia de sistemas de climatización activos. A continuación, se presentan las estrategias pasivas de enfriamiento más destacadas, analizadas en detalle.

I. Protección Solar

La protección solar es una estrategia fundamental para reducir la ganancia térmica en las edificaciones. Consiste en bloquear o controlar la radiación solar mediante elementos arquitectónicos como aleros, persianas, voladizos, y fachadas ventiladas. Estos elementos limitan la incidencia directa del sol, reduciendo la temperatura interior y disminuyendo la necesidad de climatización mecánica.

Según Olgyay (1963), una adecuada protección solar no solo reduce el calor interior, sino que también contribuye al confort visual al evitar el deslumbramiento excesivo.

En la actualidad, el uso de materiales de alta reflectancia y películas solares es una tendencia importante. La incorporación de superficies con bajo coeficiente de absorción solar y alta reflectividad, como los techos fríos, puede disminuir significativamente la temperatura de la envolvente del edificio (Santamouris, 2019). Además, el diseño de soluciones específicas para cada orientación del edificio resulta crucial, ya que las necesidades de protección solar varían según la posición del sol y las estaciones del año (Lechner, 2014).

II. Masa Térmica

La masa térmica es la capacidad de ciertos materiales para absorber, almacenar y liberar calor de manera gradual, lo cual ayuda a estabilizar la temperatura interior de los edificios. Esta técnica es particularmente efectiva en climas con grandes oscilaciones térmicas diarias, como los climas cálidos y secos. Givoni (1998) destaca

que el uso de materiales con alta inercia térmica, como ladrillos, concreto o piedra, permite almacenar calor durante el día y liberarlo durante la noche, contribuyendo a mantener un ambiente interior confortable sin recurrir a sistemas mecánicos de climatización.

En investigaciones recientes, se ha explorado el uso de materiales avanzados, como los materiales de cambio de fase (PCM), que mejoran aún más la capacidad de almacenamiento térmico de los edificios. Aunque los PCM presentan costos iniciales elevados, su efectividad en la reducción de la temperatura interior y el consumo energético ha sido demostrada en numerosos estudios (Boobalakrishnan et al., 2021; Mano & Thongtha, 2021). La selección de los materiales adecuados para masa térmica debe considerar las características específicas del clima y las necesidades térmicas del edificio.

III. Ventilación Natural

La ventilación natural es una técnica de enfriamiento pasivo que utiliza el aire exterior para refrescar los espacios interiores, eliminando el calor acumulado y mejorando la calidad del aire. Las estrategias incluyen la ventilación cruzada, la ventilación por efecto chimenea y el uso de torres de viento, cada una adaptada a distintas configuraciones arquitectónicas y necesidades climáticas (László et al., 2020).

Para optimizar la ventilación natural en climas cálidos y secos, el diseño de las aberturas y la orientación del edificio son aspectos cruciales. La disposición estratégica de ventanas y rejillas de ventilación, junto con el uso de elementos que promuevan el movimiento del aire, mejora considerablemente la eficiencia de esta técnica (Lechner, 2014). Además, el uso combinado de ventilación natural con otras estrategias pasivas, como la masa térmica, puede potenciar los efectos de enfriamiento (Bhamare et al., 2019).

IV. Paisajismo

El paisajismo es una herramienta valiosa para el control pasivo del entorno térmico de un edificio. La incorporación de vegetación en el entorno inmediato del edificio proporciona sombra, reduce la temperatura del aire circundante y mejora el

microclima. El uso de árboles de hoja caduca permite bloquear la radiación solar en verano y dejar pasar la luz en invierno, ajustando las condiciones de confort térmico de manera estacional (Santamouris, 2019). Además, el uso de cubiertas verdes y jardines verticales contribuye a la reducción del efecto de isla de calor urbana, lo que resulta beneficioso para áreas industriales.

Es importante seleccionar especies vegetales adecuadas para climas cálidos y secos, ya que el uso de plantas autóctonas y resistentes a la sequía reduce el consumo de agua y mejora la sostenibilidad del diseño. Othman et al. (2020) demostraron que la incorporación de vegetación nativa en entornos industriales puede mejorar significativamente la eficiencia térmica del edificio al modificar el microclima circundante.

2.2.2 Sistemas Activos: Tecnologías y sistemas mecánicos que sustituyen las estrategias pasivas.

En esta sección se delimita el funcionamiento de los sistemas activos, definidos como soluciones energéticas que dependen de equipos mecánicos y suministro externo para mantener el confort interior, en contraste con los mecanismos pasivos previamente descritos.

2.2.2.1. Conceptualización de Sistemas Activos

Los sistemas activos representan tecnologías mecánicas y eléctricas diseñadas para controlar de forma precisa las condiciones ambientales internas, tales como la temperatura, la calidad del aire y la iluminación en edificios industriales. A diferencia de los sistemas pasivos, que se basan en el diseño arquitectónico y en la utilización de recursos naturales para regular las condiciones interiores, los sistemas activos requieren un suministro energético continuo para funcionar.

Esta característica los convierte en elementos esenciales para garantizar el confort térmico y la eficiencia energética en climas extremos, donde las estrategias

pasivas pueden no ser suficientes para cubrir las necesidades de enfriamiento o calefacción (Lechner, 2014; ASHRAE, 2019).

En la rehabilitación energética de edificios industriales, los sistemas activos desempeñan un papel crucial para optimizar el rendimiento energético y reducir el impacto ambiental, especialmente en instalaciones de gran tamaño o con procesos industriales que generan altas cargas térmicas. Las tecnologías activas incluyen sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), climatización adiabática, sistemas de recuperación de calor, iluminación eficiente, y controles inteligentes.

2.2.2.2. Tipos de Sistemas Activos

A continuación, se presentan los principales sistemas activos aplicados en el acondicionamiento térmico de edificaciones, con énfasis en aquellos que intervienen en el control directo de las condiciones interiores mediante energía mecánica y procesamiento térmico.

I. Sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado):

Los sistemas HVAC son fundamentales en la rehabilitación de edificios industriales, ya que permiten mantener condiciones de confort y controlar con precisión la temperatura y la calidad del aire. En los climas cálidos secos, la implementación de sistemas HVAC de alta eficiencia energética puede ser complementada con tecnologías de recuperación de calor, bombas de calor, y variadores de frecuencia que optimizan el consumo eléctrico.

Según estudios de Omer (2008), los sistemas HVAC avanzados con controles automatizados y sensores mejoran significativamente la eficiencia energética, al adaptar la operación del sistema a las necesidades cambiantes del entorno.

La adopción de tecnologías de recuperación de calor, como los intercambiadores de calor aire-aire, permite aprovechar el calor residual para precalentar o enfriar el aire entrante, reduciendo así la carga térmica en los sistemas de climatización y el consumo energético. Además, el uso de bombas de calor

geotérmicas, que intercambian calor con el suelo o el agua subterránea, ofrece una opción de alta eficiencia en climas extremos (ASHRAE, 2019; Chua & Chou, 2010).

II. Sistemas de Climatización Adiabática:

Los sistemas de enfriamiento adiabático son especialmente efectivos en climas áridos y cálidos, ya que aprovechan la baja humedad ambiental para reducir la temperatura del aire mediante la evaporación del agua. Estos sistemas utilizan menos energía en comparación con los aires acondicionados convencionales y son capaces de mantener temperaturas interiores confortables en edificaciones industriales.

Santamouris (2019) señala que, en condiciones climáticas secas, el enfriamiento adiabático puede reducir la temperatura del aire en hasta 15 °C, mejorando considerablemente la eficiencia del sistema global.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que su efectividad disminuye en entornos con alta humedad, por lo que la combinación de enfriamiento adiabático con otras tecnologías, como la ventilación cruzada o la recuperación de calor, puede mejorar los resultados en distintos contextos (Chua & Chou, 2010).

III. Tecnologías Avanzadas de Iluminación Artificial:

El uso de tecnología LED y sistemas de control inteligente para la iluminación permite disminuir el consumo eléctrico asociado a la iluminación y reducir la carga térmica del edificio.

Los sistemas de iluminación inteligente incluyen sensores de presencia y controles de intensidad lumínica que se ajustan automáticamente según la disponibilidad de luz natural o la ocupación del espacio, optimizando el uso de la energía. Givoni (1998) y Omer (2008) destacan que, al reducir la producción de calor interno y optimizar la distribución de la iluminación, estos sistemas no solo mejoran las condiciones de trabajo, sino que también contribuyen a una mayor eficiencia energética global del edificio.

IV. Controles Inteligentes y Automatización de Edificios:

La integración de sistemas de gestión de edificios (BMS) y tecnologías de automatización permite monitorear y controlar los sistemas HVAC, iluminación y

climatización adiabática de forma centralizada. Los BMS ajustan el funcionamiento de los sistemas en respuesta a las condiciones ambientales externas y las necesidades internas, lo que resulta en una operación más eficiente y adaptable. Según Lechner (2014), la implementación de sistemas inteligentes puede reducir el consumo energético hasta en un 30% mediante el ajuste dinámico de la temperatura, la ventilación y la iluminación.

2.2.3 Sistemas Híbridos: Combinación de enfoques pasivos y activos para maximizar la eficiencia energética.

El enfoque híbrido busca equilibrar el uso de estrategias pasivas y activas. Las estrategias pasivas, como la ventilación natural, la masa térmica y la protección solar, proporcionan soluciones no mecánicas que permiten un control térmico eficiente sin un alto consumo energético (Givoni, 1998). Estas estrategias se complementan con sistemas activos, como el aire acondicionado o la ventilación mecánica, que aseguran un confort térmico adecuado cuando las condiciones externas no permiten el uso exclusivo de enfoques pasivos (Harvey, 2013).

Por ejemplo, un edificio puede utilizar masa térmica para absorber el calor durante el día y liberarlo lentamente por la noche, mientras que un sistema HVAC puede activarse durante las horas más calurosas para mantener una temperatura interior constante. Esta combinación reduce la carga operativa de los sistemas mecánicos y prolonga su vida útil (Cabeza et al., 2010).

2.2.3.1. Estrategias Híbridas en la Rehabilitación Energética

La rehabilitación energética de edificios industriales requiere de una integración cuidadosa de soluciones híbridas que combinen elementos pasivos y activos. Algunos ejemplos incluyen:

Fachadas ventiladas y sistemas de ventilación forzada: Las fachadas ventiladas permiten la circulación de aire entre dos capas de la envolvente del edificio, lo que reduce la carga térmica. Combinadas con sistemas de ventilación mecánica, pueden

disipar el calor acumulado de manera más eficiente, optimizando el uso de energía (Aelenei & Gonçalves, 2014).

Sistemas de masa térmica combinados con HVAC: Los elementos de masa térmica, como muros gruesos de hormigón, ayudan a estabilizar las fluctuaciones de temperatura al absorber calor durante el día. Estos se complementan con sistemas HVAC que se activan cuando las temperaturas alcanzan niveles críticos, asegurando un confort óptimo (Lechner, 2014).

Ventilación natural combinada con ventilación mecánica: En edificios industriales con grandes espacios, la ventilación cruzada puede aprovechar el flujo natural de aire. Durante los días calurosos, se complementa con sistemas de ventilación mecánica para garantizar un flujo constante de aire fresco (Givoni, 1998).

2.2.3.2. Ventajas y Desafíos de los Sistemas Híbridos

Ventajas:

I. Reducción del consumo energético:

Los sistemas híbridos maximizan el uso de recursos naturales, como la radiación solar y el viento, para regular la temperatura interna, disminuyendo así la dependencia de sistemas mecánicos (Harvey, 2013).

II. Mejora del confort térmico:

Al combinar estrategias pasivas y activas, se logra un control más preciso del ambiente interno, proporcionando mayor estabilidad térmica y mejorando las condiciones de trabajo (Lechner, 2014).

III. Sostenibilidad:

La integración de estos sistemas reduce la huella de carbono del edificio y promueve un uso más eficiente de la energía (Santamouris, 2019).

Desafíos:

I. Diseño complejo:

La implementación de sistemas híbridos requiere un análisis detallado del clima local, la arquitectura del edificio y las necesidades operativas, lo que puede aumentar los costos de diseño y planificación (Cabeza et al., 2010).

II. Costos iniciales elevados:

Aunque a largo plazo se logran importantes ahorros energéticos, la inversión inicial en materiales de masa térmica, sistemas avanzados de ventilación y control puede ser considerable (Aelenei & Gonçalves, 2014).

2.3. Retrofit Energético en Edificios Industriales

En este apartado se exponen los fundamentos conceptuales que sustentan el retrofit energético, con énfasis en su aplicación en edificaciones industriales bajo criterios de eficiencia energética y rehabilitación de sistemas pasivos y activos.

2.3.1 Definición y Conceptos del Retrofit Energético: Eficiencia energética en edificios industriales.

El retrofit energético en edificios industriales implica la actualización o modificación de los sistemas existentes para mejorar su eficiencia energética, reduciendo el consumo de energía y minimizando los costos operativos. Lovins (1977) introdujo el concepto de "negavatios", que enfatiza el ahorro energético a través de medidas eficientes como una alternativa al aumento de la capacidad energética. Este enfoque ha evolucionado para incluir el retrofit como una de las estrategias clave para optimizar el uso de la energía en edificaciones industriales.

Según Pérez-Lombard, Ortiz, y Pout (2008), el retrofit abarca desde la modernización de sistemas HVAC hasta la mejora de la envolvente arquitectónica. Esto implica la adopción de tecnologías avanzadas y el rediseño de elementos constructivos para reducir las pérdidas de energía. Mills (2011) destaca que las

intervenciones de retrofit pueden incluir la integración de sistemas de control inteligentes, la optimización de la iluminación y la implementación de aislamiento térmico avanzado, con beneficios notables en la reducción de la huella de carbono.

2.3.2 Estrategias de Retrofit Energético: Técnicas aplicadas a la envolvente arquitectónica, HVAC, iluminación y otros sistemas.

Las estrategias de retrofit energético se clasifican en varias categorías, cada una enfocada en un componente específico del edificio. Las principales estrategias incluyen:

I. Envolvente Arquitectónica:

La optimización de la envolvente implica la mejora del aislamiento térmico en muros, techos y ventanas, para reducir las pérdidas de calor. Ma, Cooper, Daly, y Ledo (2012) señalan que la adición de aislamiento de alta eficiencia y el uso de materiales reflectantes pueden reducir significativamente la demanda energética en climas cálidos y secos.

II. Sistemas HVAC:

La modernización de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) puede incluir la adopción de tecnologías de recuperación de calor, enfriamiento evaporativo o adiabático, y sistemas de control de temperatura más eficientes. Ascione et al. (2017) indican que la integración de sistemas de recuperación de calor en edificios industriales puede reducir el consumo energético hasta en un 30%.

III. Iluminación:

La sustitución de tecnologías tradicionales por iluminación LED de alta eficiencia y el uso de controles automatizados permiten reducir el consumo eléctrico asociado a la iluminación en más del 50% (Pomponi y Moncaster, 2018).

IV. Sistemas de Almacenamiento Térmico:

La implementación de tecnologías como los materiales de cambio de fase (PCM) y el almacenamiento de energía térmica ayuda a equilibrar la demanda

energética diaria. Cabeza et al. (2010) explican que el uso de almacenamiento térmico en edificios industriales es crucial para mejorar la eficiencia energética y reducir los picos de demanda.

2.3.3 Evaluación del Impacto Energético del Retrofit: Metodologías para medir la eficiencia energética tras la implementación del retrofit.

La evaluación del impacto del retrofit energético se realiza mediante diversas metodologías que permiten medir la eficiencia antes y después de la intervención. Según Rasmussen, Jensen, y Olesen (2011), las principales técnicas de evaluación incluyen:

I. Auditorías Energéticas Pre y Post-Retrofit:

Estas auditorías permiten evaluar los cambios en el consumo energético mediante la recopilación de datos antes y después de la implementación del retrofit. Es fundamental establecer líneas base precisas para obtener resultados fiables.

II. Simulaciones Energéticas:

Herramientas como EnergyPlus y DesignBuilder permiten modelar el comportamiento térmico del edificio y analizar el impacto de diferentes estrategias de retrofit. Aste, Angelotti, y Buzzetti (2009) sugieren que las simulaciones son esenciales para predecir el ahorro energético potencial y optimizar el diseño de las intervenciones.

III. Análisis de Coste-Beneficio:

El análisis económico es clave para evaluar la viabilidad del retrofit energético. Korytarova y Üрге-Vorsatz (2017) destacan que el costo inicial de las intervenciones puede ser compensado por los ahorros a largo plazo, lo que justifica la inversión en la mayoría de los casos.

2.4. Técnicas de Enfriamiento Pasivo

Este apartado introduce las principales técnicas de enfriamiento pasivo aplicables a edificaciones industriales, destacando sus fundamentos físicos, principios operativos y condiciones de aplicabilidad en climas cálido seco extremo.

2.4.1 Generalidades del Enfriamiento Pasivo: Introducción a las técnicas y su aplicabilidad.

El enfriamiento pasivo es una estrategia clave para reducir la carga térmica en edificios, especialmente en climas cálidos y secos. Se basa en el uso de los recursos naturales del entorno (como el sol, el viento y la masa térmica) para regular la temperatura interior sin recurrir a sistemas mecánicos de climatización.

Según Olgyay (1963), los principios del diseño bioclimático ofrecen un marco sólido para el desarrollo de edificaciones que aprovechen las condiciones climáticas locales para mejorar el confort térmico, reduciendo la necesidad de energía.

Autores como Givoni (1998) destacan la importancia de diseñar edificios que integren estos principios para lograr un equilibrio entre la temperatura exterior y la interior. Lechner (2014) también señala que el enfriamiento pasivo no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también mejora la sostenibilidad del edificio al reducir el uso de recursos no renovables.

La aplicabilidad de estas técnicas es particularmente relevante en climas cálidos secos, donde las altas temperaturas diurnas y las bajas temperaturas nocturnas permiten aprovechar estrategias como la ventilación nocturna y la masa térmica para regular las temperaturas interiores.

2.4.2 Protección Solar y Térmica: Estrategias para reducir la carga térmica.

En este apartado se analizan los mecanismos de control solar y térmico orientados a limitar la incidencia de radiación y disminuir la carga térmica transmitida al interior de la edificación, considerando su aplicación en el contexto de rehabilitación energética de edificios industriales en climas cálido-secos.

2.4.2.1 Control Solar: Materiales y diseño arquitectónico para el control solar.

El control solar es fundamental para mitigar la ganancia de calor en edificios ubicados en climas cálidos y secos. La correcta orientación de las edificaciones, combinada con el uso de materiales adecuados para sombrear y reflejar la radiación solar, puede reducir considerablemente la carga térmica. Según Baker y Steemers (2000), los materiales de sombreado y las estructuras de protección solar, como toldos y parasoles, permiten que el edificio reciba iluminación natural sin sobrecalentarse.

Además, Givoni (1998) sugiere que las soluciones de control solar pasivo, como los sistemas de fachadas ventiladas, pueden reducir en un 30% la cantidad de energía requerida para enfriar el edificio, al disminuir la radiación directa. Estas estrategias son particularmente efectivas en edificios industriales, donde las grandes superficies expuestas al sol pueden beneficiarse de un diseño arquitectónico optimizado.

2.4.2.2. Paisajismo y Vegetación: Uso del paisajismo para mejorar el microclima.

El paisajismo puede desempeñar un papel crucial en la creación de un microclima favorable alrededor de los edificios, mejorando tanto la eficiencia energética como el confort térmico. Según Akbari et al. (2001), la vegetación, especialmente los árboles de sombra, no solo reduce la temperatura del aire circundante, sino que también disminuye la carga térmica sobre las superficies expuestas del edificio, reduciendo la necesidad de enfriamiento mecánico.

Además, el uso de techos verdes y fachadas vegetales, como se detalla en el estudio de McPherson et al. (1994), contribuye a la reducción del efecto isla de calor y al aislamiento térmico, lo que resulta en menores costos energéticos y mayor confort en zonas urbanas densamente pobladas.

2.4.3. Amortiguamiento Térmico: Estrategias para el control de la temperatura interna.

Este apartado aborda las técnicas de amortiguamiento térmico aplicadas a la envolvente arquitectónica, enfocadas en estabilizar la temperatura interior mediante el aprovechamiento de la masa térmica, reduciendo así las fluctuaciones térmicas en edificaciones industriales expuestas a climas cálido seco extremo.

2.4.3.1. Masa Térmica: Estrategias para usar la masa térmica en la regulación térmica.

La masa térmica es una de las estrategias pasivas más efectivas para regular la temperatura en edificios industriales. Este concepto se refiere a la capacidad de los materiales de construcción, como el hormigón o la piedra, para absorber y almacenar calor durante el día, liberándolo lentamente cuando la temperatura exterior desciende. Según Yannas (1994), la masa térmica bien utilizada puede estabilizar las temperaturas interiores, reduciendo las fluctuaciones térmicas diarias.

Lechner (2014) también subraya la importancia de la ubicación y el diseño adecuado de los elementos de masa térmica, como los muros gruesos y los pisos de hormigón, para maximizar su efectividad. En climas cálidos secos, donde las variaciones de temperatura entre el día y la noche son significativas, la masa térmica puede mantener el edificio fresco durante el día y cálido por la noche.

2.4.3.2. Aislamiento Térmico: Materiales y técnicas de aislamiento.

El aislamiento térmico es esencial para mantener el confort térmico en edificios industriales sin recurrir al uso intensivo de sistemas mecánicos. Según Straube y Burnett (2005), el uso de materiales aislantes adecuados en las envolventes de los edificios (muros, techos y ventanas) permite controlar las pérdidas y ganancias de calor, optimizando el rendimiento energético del edificio.

En climas cálidos secos, el aislamiento térmico debe ser diseñado para minimizar la transferencia de calor desde el exterior al interior, especialmente durante

las horas de mayor radiación solar. Loonen et al. (2013) destacan los avances recientes en materiales de aislamiento adaptativo, que responden a las condiciones climáticas externas, proporcionando un control térmico eficiente y mejorando la sostenibilidad del edificio.

2.4.4. Disipación de Calor: Estrategias para disipar calor

En este apartado se presentan los mecanismos pasivos orientados a facilitar la evacuación del calor acumulado en el interior de los edificios industriales, mediante técnicas de ventilación natural, cruzada y de extracción térmica, fundamentales en la reducción de cargas térmicas en climas cálido-secos.

2.4.4.1. Ventilación Natural: Diseño y eficacia de la ventilación natural y cruzada.

La ventilación natural es una estrategia clave para disipar el calor en climas cálidos y secos, aprovechando el flujo de aire exterior para refrescar el interior del edificio. Según Givoni (1994), la ventilación cruzada, que se basa en la colocación estratégica de aberturas en el edificio para maximizar el flujo de aire, es particularmente efectiva en edificios industriales con grandes espacios interiores.

Walker y Wilson (1998) muestran que la ventilación natural bien diseñada puede reducir en un 25% la necesidad de enfriamiento mecánico, lo que resulta en un ahorro energético considerable y un mejor confort para los ocupantes.

2.4.4.2. Tecnologías de Enfriamiento Radiante y Evaporativo: Uso de torres de viento y otras tecnologías.

Las tecnologías de enfriamiento radiante y evaporativo son fundamentales en la disipación de calor en climas cálidos y secos. Según Santamouris (2019), las torres de viento y los sistemas de enfriamiento por evaporación han sido utilizados durante

siglos en regiones áridas para reducir las temperaturas interiores mediante la circulación de aire fresco.

Bahadori (1978) destaca que las torres de viento pueden reducir las temperaturas interiores en hasta 10 °C sin necesidad de energía mecánica, lo que convierte a estas tecnologías en una solución altamente eficiente para los edificios industriales en climas extremos.

2.5. Normativa y Regulación

En este apartado se analiza el marco normativo vigente en materia de eficiencia energética aplicable a edificios industriales, tanto a nivel internacional como nacional, considerando su relevancia para el contexto metodológico del presente trabajo. Se distinguen aquellas normativas de aplicación directa, las de referencia técnica y aquellas cuyo alcance es limitado respecto al objeto de estudio.

2.5.1 Marco Regulatorio Local e Internacional: Impacto de la legislación en el diseño operación de edificios.

El marco regulatorio vinculado a la eficiencia energética de edificaciones industriales presenta diferencias sustanciales según el contexto geográfico. En el ámbito internacional, destacan normativas de referencia ampliamente adoptadas en sectores industriales.

La ISO 50001 establece los lineamientos para implementar sistemas de gestión energética orientados a optimizar el desempeño energético de las organizaciones industriales. Esta norma, basada en el ciclo de mejora continua (Plan-Do-Check-Act), permite sistematizar el control de consumos energéticos, facilitar el cumplimiento de objetivos de reducción de emisiones de CO₂ y establecer políticas sostenibles de operación.

Por su parte, la ASHRAE Standard 90.1 constituye uno de los principales marcos normativos técnicos aplicados al diseño y operación de sistemas energéticos

en edificaciones comerciales e industriales. Su contenido regula parámetros específicos de eficiencia energética en sistemas HVAC, aislamiento térmico, iluminación y equipos eléctricos. La edición vigente ASHRAE 90.1-2019 proporciona criterios detallados frecuentemente adoptados como referencia en códigos de energía de múltiples países.

En el contexto europeo, la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD) incorpora disposiciones dirigidas a mejorar el comportamiento energético de edificaciones. Aunque su énfasis recae principalmente en el sector residencial y terciario, establece principios generales de eficiencia energética aplicables al sector industrial, incluyendo la integración de energías renovables, mejoras de aislamiento térmico y la ejecución de auditorías energéticas obligatorias para grandes instalaciones industriales (EPBD 2018/844).

En México, el marco normativo específico para edificaciones industriales es limitado. Las Normas Oficiales Mexicanas NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001 abordan criterios de eficiencia energética aplicables principalmente a la envolvente térmica de edificios habitacionales y de oficinas, sin extender su alcance a instalaciones industriales. En consecuencia, su aplicabilidad directa al objeto de estudio es restringida.

Sin embargo, diversas empresas industriales en el país han adoptado voluntariamente la ISO 50001 como sistema interno de gestión energética, mientras que estándares internacionales como ASHRAE 90.1 son utilizados como referencia técnica para optimizar el diseño de sistemas constructivos y operativos en edificios industriales.

2.5.2 Cumplimiento y Certificaciones: Relevancia de las certificaciones energéticas.

El cumplimiento normativo puede complementarse mediante esquemas de certificación energética, los cuales permiten acreditar el desempeño energético y ambiental de edificaciones industriales bajo estándares internacionales.

La ISO 50001 constituye la certificación de gestión energética más extendida en el ámbito industrial, proporcionando el marco metodológico para documentar, controlar y mejorar el desempeño energético organizacional bajo el esquema PDCA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar), lo que permite establecer procesos de mejora continua en la operación energética.

La certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), inicialmente desarrollada para edificaciones comerciales y habitacionales, ha incorporado módulos aplicables a instalaciones industriales, incluyendo criterios de eficiencia en sistemas HVAC, iluminación natural, uso de energías renovables, eficiencia hídrica y estrategias pasivas de control térmico.

Por otro lado, la norma ASHRAE Standard 189.1 propone lineamientos avanzados de diseño sostenible para edificaciones industriales, integrando parámetros de eficiencia energética, reducción de emisiones, gestión de recursos y desempeño ambiental integral. La complementariedad entre los estándares LEED y ASHRAE 189.1 permite estructurar proyectos industriales bajo criterios de sostenibilidad técnica de alto nivel.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Este capítulo documenta el procedimiento metodológico implementado para evaluar el comportamiento térmico de una edificación industrial ligera ubicada en Mexicali, Baja California. La investigación adopta un enfoque cuantitativo, comparativo y cuasi experimental aplicado, orientado a determinar el impacto específico de estrategias pasivas de enfriamiento aplicadas sobre la envolvente arquitectónica bajo condiciones climáticas cálido-secas extremosas.

El diseño cuasi experimental se sustenta en la instrumentación directa del caso de estudio, la manipulación controlada de variables independientes mediante simulaciones numéricas, y la comparación sistemática de escenarios frente a un modelo base validado. La metodología se articula en seis fases técnicas, diseñadas para garantizar control de variables, replicabilidad de simulaciones y validez empírica del modelo.

La descripción secuencial del esquema metodológico desarrollado se presenta de forma integrada en la Tabla 7, donde se detallan las etapas técnicas y los componentes operativos considerados en el estudio.

Tabla 7. Desglose técnico por etapa metodológica del estudio.

Fase	Descripción técnica aplicada
1	Caracterización térmica y funcional del objeto de estudio
2	Monitoreo climático-instrumental
3	Construcción del modelo digital
4	Validación empírica del escenario base
5	Simulación comparativa de estrategias pasivas
6	Análisis técnico de resultados térmicos mensuales

Nota: Elaboración propia (2025).

El volumen intervenido corresponde a una fracción operativa de 546.3 m², seleccionada por criterios de accesibilidad, heterogeneidad funcional y comportamiento térmico representativo. Esta zona incorpora espacios tanto

climatizados como no climatizados, lo que permite simular escenarios contrastantes bajo un mismo entorno constructivo.

El modelo digital fue desarrollado en DesignBuilder® v7.0, empleando parámetros reales de ocupación, cargas internas y perfiles de uso. La validación del modelo se efectuó mediante el índice PMARE (Percent Mean Absolute Relative Error), utilizando registros instrumentales obtenidos durante el mes de mayo como referencia empírica.

La clasificación metodológica de las estrategias pasivas aplicadas se organiza en tres grupos estratégicos, resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación estratégica de las intervenciones pasivas

Fase	Descripción técnica aplicada
Protección solar y térmica	Sombreado en cubierta, recubrimientos reflectantes, protección de muros expuestos
Amortiguamiento térmico	Aislamiento de cubierta y muros, mejora de masa térmica
Disipación de calor	Aperturas controladas, ventilación natural, extracción térmica estructural

Nota: Elaboración propia (2025).

Cada intervención fue evaluada bajo condiciones constantes de clima, horarios operativos, cargas térmicas internas y distribución espacial, lo que garantiza el aislamiento metodológico de los efectos térmicos específicos asociados a cada estrategia, minimizando interferencias por variables no controladas.

El diseño metodológico asegura trazabilidad del procedimiento, validez técnica de los resultados e integridad comparativa entre escenarios.

3.1 Diseño metodológico del experimento y estrategia de simulación

3.1.1 Tipo de estudio y enfoque de investigación

El presente estudio adopta un diseño cuantitativo, cuasi-experimental y comparativo, orientado a evaluar el impacto térmico de estrategias pasivas aplicadas sobre la envolvente de una edificación industrial ligera ubicada en clima cálido seco extremo. El enfoque permite establecer relaciones controladas entre las intervenciones pasivas y los resultados térmicos, integrando mediciones empíricas y simulación validada.

Aunque no se realizaron modificaciones físicas durante el análisis, el diseño incorpora observación directa y monitoreo instrumental in situ, lo que permitió calibrar un modelo digital representativo. Sobre esta base empírica, el experimento se desarrolló virtualmente mediante un modelo tridimensional construido en DesignBuilder® v7.0, operado con EnergyPlus® v9.6.0, integrando la geometría real, cargas internas verificadas, horarios operativos y propiedades térmicas caracterizadas.

El esquema cuasi-experimental aplicado combina medición térmica directa en condiciones reales de operación con simulación digital validada. Si bien la simulación permite controlar las condiciones de contorno (clima, ocupación, cargas, horarios y sistemas) durante la evaluación comparativa de escenarios, el modelo se calibró sobre datos empíricos afectados por variables no manipulables directamente durante el monitoreo. Este control parcial de las variables independientes, junto con la incorporación de observación instrumental real, otorga al diseño su carácter.

La validación del modelo base se realizó mediante el índice PMARE (Percent Mean Absolute Relative Error), aplicado sobre datos monitoreados durante el mes de mayo, seleccionando el día crítico de mayor carga térmica como referencia estadística. Este método permite cuantificar desviaciones puntuales de temperatura operativa con alta sensibilidad.

Los componentes técnicos de este diseño metodológico se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Componentes técnicos del diseño metodológico adoptado.

Componente del diseño	Descripción aplicada en este estudio
Tipo de diseño	Cuantitativo, cuasi-experimental, comparativo, longitudinal
Unidad de análisis	Envolvente arquitectónica de una edificación industrial ligera
Herramienta de simulación	DesignBuilder® v7.0 (motor EnergyPlus® v9.6.0)
Validación del modelo	Índice PMARE (Percent Mean Absolute Relative Error)
Variables independientes	Estrategias pasivas aplicadas (protección solar y térmica, amortiguamiento térmico, disipación de calor)
Variables dependientes	Temperatura operativa interior (°C)
Indicadores derivados	Reducción térmica mensual (ΔT), reducción promedio anual, reducción en periodo crítico (mayo-septiembre)
Constantes del modelo	Clima (EPW), horarios, cargas internas, ocupación, condiciones límite térmicas, propiedades constructivas no intervenidas
Método de comparación	Comparación de escenarios pasivos individuales frente al modelo base, bajo condiciones de contorno controladas y constantes

Nota: Elaboración propia (2025).

La estructura del experimento garantiza el control metodológico de los factores externos al análisis, permitiendo evaluar el desempeño térmico de cada estrategia pasiva con independencia de otras variables contextuales. Para eliminar cualquier sesgo asociado a variabilidad estacional o eventos meteorológicos atípicos, todas las simulaciones fueron ejecutadas bajo un conjunto constante de condiciones límite y climáticas, garantizando uniformidad absoluta en el tratamiento comparativo.

3.1.2 Alcance espacial y temporal del análisis

La investigación se desarrolla en el municipio de Mexicali, Baja California, ubicado en la región noroeste de México, dentro del dominio climático árido continental. Sus coordenadas geográficas (32.66° N, 115.46° O) y su altitud de 8.2 m s. n. m. sitúan el objeto de estudio en una zona caracterizada por altas temperaturas,

baja humedad relativa y fuerte radiación solar directa, factores determinantes en el comportamiento térmico de edificaciones sin protección pasiva.

Según la clasificación del Sistema de Información Climática Nacional (SICN), el sitio se categoriza como clima cálido seco extremoso. En la nomenclatura internacional Köppen-Geiger, esta condición corresponde a la categoría BWh (desértico cálido árido), definida por temperaturas medias anuales superiores a 22 °C, precipitaciones menores a 100 mm y oscilaciones térmicas diarias superiores a 15 °C durante los meses de mayor severidad.

En términos de simulación, el análisis térmico se extendió a un ciclo anual completo, sin aplicar ajustes estacionales en los parámetros de operación, con el objetivo de preservar la comparabilidad objetiva entre los escenarios evaluados. Cada estrategia fue analizada bajo condiciones constantes de uso, carga interna y régimen de ventilación natural, eliminando distorsiones atribuibles a perfiles horarios dinámicos o estacionales no controlados.

Para alimentar el modelo se empleó el archivo climático en formato EPW, identificado como MEXICALI_INTL_Aeropuerto M7.epw, correspondiente a la localidad de Mexicali, Baja California. Este archivo fue construido como un Año Climático Típico (TMY), a partir de registros multianuales homogeneizados provenientes de la estación meteorológica oficial Mexicali-Taboada (WMO 760053), perteneciente a la Región 4 de la Organización Meteorológica Mundial (WMO Region 4 – North and Central America).

El archivo EPW seleccionado presenta las siguientes ventajas metodológicas fundamentales:

I. Compatibilidad directa con los motores de simulación empleados (DesignBuilder® / EnergyPlus®).

II. Continuidad horaria completa, sin vacíos de datos ni interpolaciones forzadas en las variables meteorológicas.

III. Representatividad estadística validada para el comportamiento térmico característico de climas cálido secos extremosos, como el de Mexicali, en función de su construcción multianual integrada.

El uso de este archivo permitió establecer una base climática homogénea y replicable para la comparación controlada de los escenarios pasivos planteados en la investigación, asegurando la coherencia térmica de referencia durante todo el proceso de modelado.

Las condiciones climáticas mensuales, obtenidas del archivo climático utilizado, se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros climáticos mensuales – Mexicali, Baja California.

Mes	Temp. Media (°C)	Temp. Máxima (°C)	HR Promedio (%)	Radiación Global Promedio (kWh/m ² /día)
Enero	14.46	26.4	56.30	3.11
Febrero	15.98	28.4	55.92	3.85
Marzo	20.07	34.6	50.24	4.99
Abril	22.56	36.8	47.58	5.98
Mayo	28.50	42.6	42.20	6.55
Junio	31.89	44.5	42.24	6.87
Julio	35.08	47.1	47.08	7.10
Agosto	34.40	45.2	50.48	6.63
Septiembre	31.41	43.0	47.89	5.71
Octubre	25.03	39.2	49.24	4.28
Noviembre	18.57	32.3	53.83	3.50
Diciembre	13.54	26.1	59.12	2.90

Nota: Con base en archivo climático horario EPW estandarizado para Mexicali (EnergyPlus Weather). Elaboración propia (2025).

Al finalizar esta etapa de configuración climática y definición del marco temporal, se procedió a la ejecución técnica del método completo, estructurado en cinco fases operativas consecutivas. Estas se resumen en la siguiente la Tabla 11.

Tabla 11. Desglose técnico por etapa metodológica del estudio.

Etapa metodológica	Componentes técnicos incluidos en cada fase		
	Instrumentos	Variables	Periodo
Monitoreo climático-térmico	Elitech RC-51H, HOBO U12-013, FLIR C5	Temperatura, humedad relativa, acumulación térmica	25 días de mayo, con registros cada 15 min.
Modelado y simulación digital	Software	Motor	Geometría
	DesignBuilder® v7.0	EnergyPlus® v9.6.0	546.3 m ²
Validación estadística	Indicador	Día validado	Comparación
	PMARE	16 de mayo	Valores simulados vs. monitoreados
Simulación de escenarios	Total	Categorías	Parámetros
	30 escenarios	Protección solar, amortiguamiento, disipación de calor	Clima, horarios, ocupación
Análisis comparativo	Indicadores	Referencia	Organización
	Reducción térmica mensual (ΔT)	Escenario base	Estrategia aplicada y mes de análisis

Nota: Elaboración propia (2025).

Este conjunto metodológico establece un entorno térmico controlado, fiel a las condiciones reales del sitio, y técnicamente robusto para evaluar el impacto de intervenciones pasivas en edificaciones industriales vulnerables a la carga térmica externa.

3.1.3 Criterios técnicos de selección del caso de estudio

La selección de este edificio no se basó en su representatividad estadística o normativa, sino en criterios metodológicos que garantizan la viabilidad del estudio y la confiabilidad de los datos empleados en el modelo.

El análisis se enfocó en una sección funcional específica del edificio, correspondiente a 546.3 m² de superficie operativa, que reúne condiciones térmicas diversas, accesibilidad plena y compatibilidad geométrica con herramientas de simulación tridimensional. Esta fracción integra zonas con y sin climatización activa, niveles contrastantes de ocupación, y orientación solar directa en elementos expuestos.

La selección final del volumen modelado se sustentó en cuatro criterios técnicos fundamentales (Tabla 12), que garantizan la viabilidad del monitoreo y la validez de su representación energética:

Tabla 12. Componentes técnicos del diseño metodológico adoptado.

Criterio técnico	Justificación aplicada
Accesibilidad operativa	Acceso continuo al edificio durante todo el periodo de monitoreo, sin restricciones normativas ni logísticas.
Instrumentación sin interferencias	Posibilidad de instalar sensores, cámaras y registradores sin alterar el uso cotidiano del espacio.
Estabilidad funcional	Actividad regular durante el mes de mayo, sin modificaciones en horarios, ocupación o configuración espacial.
Compatibilidad con simulación	Geometría simple, delimitación clara del volumen útil, y condiciones físicas adaptables a DesignBuilder®.

Nota: Elaboración propia (2025).

3.1.4 Características físicas y operativas detalladas del objeto de estudio

La sección intervenida corresponde a un volumen funcionalmente activo de una edificación industrial ligera ubicada en Mexicali, Baja California. El área analizada abarca una superficie de 546.3 m², equivalente al 30 % de la superficie total construida, delimitada dentro de un inmueble de mayor extensión. La porción no intervenida fue representada como volumen térmicamente neutro, sin contribución activa al modelo energético. La selección de esta fracción respondió a su autonomía funcional, continuidad espacial y compatibilidad geométrica con herramientas de simulación energética tridimensional.

La orientación general del edificio fue determinada mediante brújula en sitio y validada con imágenes satelitales. El volumen presenta su frente principal hacia el este, con exposición directa en ese paramento vertical durante las primeras horas del día. Este factor, sumado a la falta de dispositivos de protección solar o disipación térmica, intensifica la ganancia solar directa. Las imágenes termográficas capturadas antes del monitoreo confirmaron esta vulnerabilidad térmica, registrando acumulaciones críticas en la cubierta y muros expuestos.

Configuración constructiva general del volumen intervenido:

- Muros perimetrales: block de concreto hueco de 15 cm, sin aislamiento, con acabado vinílico blanco.
- Cubierta: lámina galvanizada acanalada (0.5 mm) sin cámara ventilada ni aislamiento térmico.
- Piso: losa de concreto de 12 cm sobre terreno natural, sin barrera térmica inferior.
- Divisiones interiores: paneles de yeso con estructura metálica y cámara de aire.
- Ventilación natural: inexistente. No hay ventanas ni tragaluces exteriores.
- Apertura térmica significativa: cortina industrial enrollable en el muro norte del área de prácticas, abierta durante el horario labora

Zonificación funcional y térmica del modelo:

La zonificación térmica se estructuró en seis nodos térmicos independientes (Tabla 13), definidos según su uso, condición de climatización y comportamiento térmico. La altura libre varía de forma significativa, especialmente en el área de prácticas.

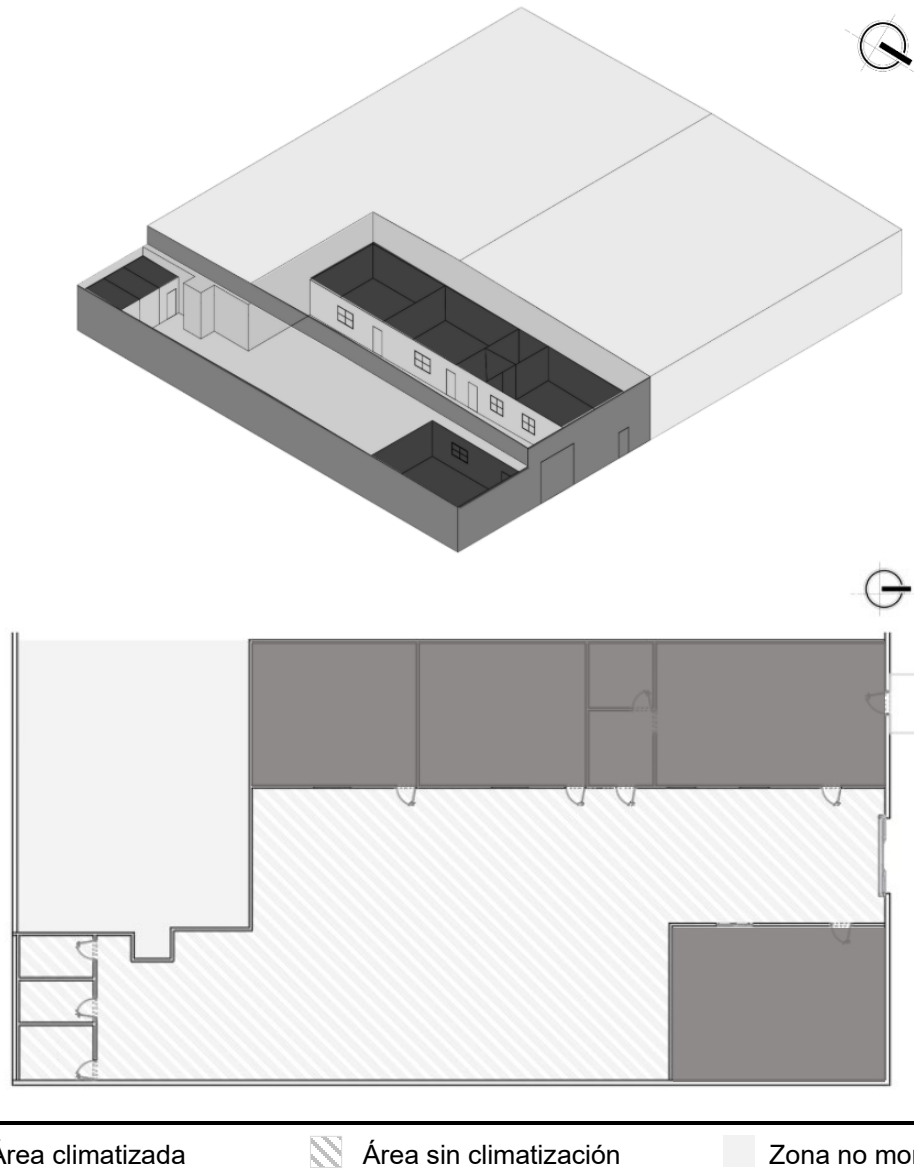
Tabla 13. Nodos térmicos del caso de estudio

Zona funcional	Código	Condición térmica	Altura libre (m)	Uso principal
Área de prácticas técnicas	PRACT	No climatizada	5.20	Capacitación técnica continua
Sala de Capacitación 1	SCI	Climatizada (minisplit)	2.60	Capacitación general programada
Sala de Capacitación 2	SC2	Climatizada (minisplit)	2.60	Capacitación técnica
Sala de Capacitación Administrativa	SC_ADM	Climatizada (minisplit)	2.60	Inducción / oficina técnica
Área Administrativa	ADM	Climatizada (minisplit)	2.60	Gestión y coordinación
Núcleo sur (Baños y Almacén)	BAÑ/ALM	No climatizada	2.60	Servicios y almacenamiento

Nota: Elaboración propia (2025).

La Figura 1, presenta el esquema en planta del volumen modelado, indicando la distribución térmica, orientación solar predominante y zonas excluidas del análisis.

Figura 1. Esquema de planta y orientación del volumen intervenido



Nota: Elaboración propia (2025).

Programación horaria para simulación energética

Las condiciones operativas reales se incorporaron al modelo mediante perfiles de simulación personalizados en DesignBuilder®, con integración de horarios de uso, niveles de ocupación, cargas de equipos, iluminación y climatización por zona. La parametrización se basó en observación funcional directa, entrevistas con usuarios responsables y levantamiento técnico efectuado in situ.

A continuación, se detallan los parámetros (Tabla 14):

Tabla 14. Parámetros operativos y de programación térmica por zona

Zona	Horario	Ocupación estimada (%)	Iluminación	Equipos	Climatización
PRACT	08:00–16:00 (L–V)	20 %	LED (manual)	No relevantes	No
SCI	08:00–16:00 (L–V)	80–100 %	LED (manual)	Proyector, PC	Minisplit manual, consigna 23 °C
SC2	08:00–16:00 (L–V)	80–100 %	LED (manual)	Proyector, PC	Minisplit manual, consigna 23 °C
SC_ADM	08:00–16:00 (L–V)	60–90 %	LED (manual)	Proyector, PC, Televisión	Minisplit manual, consigna 23 °C
ADM	08:00–16:00 (L–V)	60–90 %	Mixta (manual)	Gestión administrativa	Minisplit manual, consigna 23 °C
BAÑ/ALM	08:00–16:00 (L–V)	<10 %	Puntual (manual)	No relevantes	No

Nota: Elaboración propia (2025).

Aplicabilidad como escenario térmico de referencia

La información documentada en este subapartado constituye la base empírica del escenario previo a cualquier intervención, utilizado como referencia en la simulación energética. Su construcción se fundamentó exclusivamente en condiciones reales de operación observadas durante el periodo de análisis, sin recurrir a estimaciones o datos genéricos.

Este escenario permitió establecer una línea base térmica coherente con el funcionamiento del edificio bajo condiciones típicas de uso, cargas internas y ocupación. A partir de esta configuración fue posible comparar, con trazabilidad técnica, el efecto térmico de cada estrategia pasiva simulada.

El enfoque adoptado se alinea con las directrices de la ASHRAE (2011) para auditorías energéticas de nivel 2, y corresponde al esquema de modelado pre-retrofit,

comúnmente empleado en evaluaciones comparativas de mejora térmica en edificaciones existentes.

3.2 Caracterización del objeto de estudio

3.2.1 Descripción arquitectónica general

El objeto de estudio corresponde a una edificación industrial ligera construida sobre un lote urbano regular, con acceso directo desde la vía pública, localizada en el tejido mixto-industrial del municipio de Mexicali, Baja California. Aunque forma parte de una propiedad mayor, el edificio opera como unidad arquitectónica funcional autónoma, con acceso, operación y condiciones térmicas propias.

El volumen se encuentra alineado al límite frontal del predio, con orientación principal hacia el norte. Esta posición genera colindancias directas al este, oeste y sur, entre las cuales destaca una construcción adyacente en la fachada este, que proyecta sombra parcial sobre el paramento vertical durante las primeras horas del día, condición que fue integrada en el modelo energético como elemento adiabático.

Desde el punto de vista formal, la edificación presenta una configuración volumétrica prismática simple, con planta rectangular y altura uniforme en la mayor parte del cuerpo. Esta regularidad se ve interrumpida por una transición volumétrica localizada en el área de prácticas técnicas, donde la cubierta se eleva hasta 5.2 m, configurando un frente vertical de cubierta con exposición solar directa. El resto del volumen mantiene una altura interior de 2.6 m.

El edificio carece de ventanas exteriores, lucernarios o dispositivos integrados de ventilación cruzada. Las únicas aberturas presentes son interiores, en forma de paneles acristalados entre zonas climatizadas, insertados en particiones ligeras conformadas por paneles de yeso con estructura metálica. La envolvente exterior no incorpora mecanismos de control solar. Los accesos están conformados por puertas metálicas opacas, con excepción de una cortina industrial enrollable ubicada al norte del área de prácticas, cuya apertura durante el horario laboral fue modelada como perfil horario específico.

La sección operativa analizada correspondiente a 546.3 m² constituye el volumen sobre el cual se aplicaron tanto el monitoreo térmico como los escenarios de simulación energética. Su elección respondió a criterios de accesibilidad técnica, autonomía térmica y representatividad funcional dentro de edificaciones industriales sin aislamiento.

La edificación, en su estado actual, presenta una envolvente sin dispositivos de regulación térmica y materiales de baja inercia, lo que la convierte en un caso representativo de vulnerabilidad térmica en contextos cálido seco extremo. Su selección como objeto de estudio se justifica no por su tipología estadística, sino por su capacidad de exhibir los efectos térmicos de la intervención pasiva simulada, además de las facilidades y accesibilidad que ofrece para el desarrollo del estudio.

3.2.2 Distribución funcional y térmica por zonas

La zonificación térmica implementada en el modelo energético se estructuró con base en la configuración funcional del edificio, la condición de climatización activa, la diferencia volumétrica entre recintos y el nivel de carga térmica interna observada. Esta segmentación permitió definir nodos térmicos independientes en DesignBuilder®, representando con precisión las condiciones reales de operación del volumen intervenido.

El criterio de modelado se apoyó en los siguientes principios:

- Autonomía térmica operativa: Cada zona incluida en el modelo cuenta con una configuración específica de ocupación, equipos, iluminación y climatización. Las diferencias sustanciales entre recintos justificaron su representación como unidades térmicas separadas.
- Condición de climatización: Se distinguieron las zonas equipadas con sistemas minisplit de operación manual (zonas climatizadas), de aquellas sin ningún tipo de acondicionamiento activo (zonas no climatizadas), con implicaciones directas sobre los perfiles de carga interna y límites térmicos.

- Volumen interior diferenciado: El área de prácticas presenta una altura libre significativamente mayor que el resto del edificio (5.20 m frente a 2.60 m), además de una exposición continua a la radiación solar directa. Estas características la convierten en el nodo térmicamente más relevante, con requerimientos específicos de modelado.
- Exposición solar y orientación: Se consideraron como fronteras térmicas activas aquellos muros perimetrales con incidencia solar directa, en particular las fachadas norte y oeste, cuyo comportamiento fue monitoreado instrumentalmente y vinculado al desempeño térmico de las zonas adyacentes.
- Conectividad interior: Aunque las particiones interiores son ligeras, se evitó agrupar zonas con diferencias marcadas en uso o carga térmica. Solo los espacios de servicios (baños y almacén) fueron consolidados como un único nodo pasivo, dada su baja ocupación y comportamiento térmico homogéneo.

Esta lógica de segmentación permitió construir un modelo térmico nodal técnicamente válido, que mantiene correspondencia directa con la distribución funcional real del edificio sin sobredimensionar la cantidad de zonas simuladas.

3.2.3 Sistemas constructivos y elementos térmicos

El sistema constructivo del edificio industrial se caracteriza por soluciones de baja eficiencia térmica, propias de edificaciones destinadas a uso operativo con limitadas consideraciones de confort ambiental. Esta configuración representa un escenario representativo para evaluar el impacto de estrategias pasivas en climas cálido-secos extremos. El modelado energético en DesignBuilder® se fundamentó en la caracterización detallada de cada elemento de la envolvente.

I. Muros perimetrales

Los cerramientos verticales del edificio están contruidos con block de concreto hueco, sin aislamiento térmico adicional, ni cámara de aire. Presentan acabado

superficial en pintura vinílica blanca, tanto en su cara interior como exterior. Este sistema constructivo ofrece una masa térmica intermedia, pero sin capacidad de atenuar significativamente las oscilaciones térmicas externas.

- Espesor total: 15 cm
- Conductividad térmica (λ): 0.93 W/m·K
- Densidad: 1,400 kg/m³
- Calor específico: 840 J/kg·K
- Emisividad superficial (ϵ): 0.90

Los muros orientados al norte, sur y oeste se consideraron como fronteras térmicas activas. Particularmente, el muro norte presenta una apertura significativa por la inclusión de una puerta enrollable tipo industrial, ubicada en el acceso principal al área de prácticas, que permanece abierta durante el horario laboral (lunes a viernes), generando intercambio térmico directo con el exterior. Esta condición fue modelada como una apertura intermitente en el nodo térmico correspondiente, afectando directamente la carga térmica del volumen principal.

II. Cubierta metálica

La cubierta está conformada por un sistema de lámina galvanizada acanalada, montada sobre estructura de acero, sin aislamiento térmico ni cámara de aire. Se trata del componente constructivo con mayor ganancia térmica en el edificio, debido a su orientación horizontal y exposición continua a la radiación solar.

- Espesor de lámina: 0.5 mm
- Conductividad térmica (λ): 50.0 W/m·K
- Densidad: 7,850 kg/m³
- Calor específico: 500 J/kg·K
- Emisividad superficial: 0.85

La respuesta térmica del espacio bajo cubierta (especialmente el área de prácticas) está fuertemente influida por este componente, por lo que se consideró en

todos los escenarios de protección solar, aislamiento superior y ventilación por efecto de acumulación térmica.

III. Piso

El piso está conformado por una losa de concreto en contacto directo con el terreno, sin aislamiento térmico ni recubrimientos reflectantes. Se comporta como un elemento con alta inercia térmica, que contribuye al almacenamiento de calor en el interior durante los ciclos térmicos diarios.

- Espesor estimado: 12 cm
- Conductividad térmica (λ): 1.70 W/m·K
- Densidad: 2,200 kg/m³
- Calor específico: 880 J/kg·K
- Condición térmica: contacto directo con el terreno sin capa aislante

Este componente fue modelado como frontera térmica con masa constante y sin intercambio dinámico relevante con el exterior.

IV. Divisiones interiores y aperturas

No existen ventanas hacia el exterior. Las únicas aberturas acristaladas se encuentran en muros interiores, entre zonas funcionales climatizadas (como oficinas y salas de capacitación), construidas con paneles ligeros de yeso con inserciones de vidrio claro. Estas divisiones no generan cargas térmicas externas, pero sí influyen en la distribución del calor interno.

En el modelo energético, se consideraron como elementos interiores sin ganancia solar directa, con parámetros representativos de vidrio simple:

- Espesor del vidrio: 6 mm
- Transmitancia térmica (U): 5.7 W/m²·K
- Emisividad interior: 0.84
- Sin incidencia solar directa

La única abertura con implicación directa en la carga térmica es la puerta industrial al norte, cuyo comportamiento abierto/cerrado fue modelado mediante un perfil horario de apertura durante la jornada laboral, afectando directamente el nodo térmico del área de prácticas.

3.2.4 Condiciones de uso, ocupación y climatización

La caracterización operativa del edificio se fundamentó en un levantamiento detallado del perfil de uso, ocupación y cargas internas por zona funcional. Esta información fue empleada para configurar con precisión las condiciones internas de simulación en DesignBuilder®, permitiendo una representación fiel de la demanda térmica real. El uso se limita a días hábiles, de lunes a viernes, en horario continuo de 08:00 a 16:00 h.

I. Ocupación y uso funcional

Cada espacio presenta una densidad y patrón de uso específico. A continuación, se detallan los valores registrados (Tabla 15):

Tabla 15. Caracterización de ocupación y aporte térmico por zona funcional

Zona	Área (m ²)	Usuarios	Densidad (Pers/m ²)	Aporte térmico (W)	Carga metabólica diaria (Wh)
Administración	58.8	4	0.07	576 W	4,608 Wh/día
Almacén	8.7	1	0.11	30 W	240 Wh/día
Baños (H y M)	6.4 c/u	1 c/u	0.16	21 / 18 W	101 / 108 Wh/día
Contabilidad	7.9	1	0.13	120 W	960 Wh/día
Dirección	9.0	1	0.11	120 W	960 Wh/día
Prácticas	307.6	17	0.06	2,400 W	19,200 Wh/día
SC_ADM	41.7	16	0.38	1,620 W	12,960 Wh/día
SCI	60.5	16	0.26	1,620 W	12,150 Wh/día
SC2	42.3	16	0.38	1,620 W	12,150 Wh/día

Nota: Elaboración propia (2025).

II. Cargas térmicas internas

Las cargas internas se clasificaron en tres componentes principales: equipos, iluminación, potencia por luminarias y densidad general. A continuación, se resume su comportamiento por zona, según valores absolutos medidos o estimados (Tabla 16):

Tabla 16. Cargas internas por equipos, iluminación y densidad térmica general

Zona	Potencia equipos (W)	Iluminación (W/m ²)	Potencia luminarias (W)	Densidad de potencia general (W/m ²)
Administración	2,618	2.45	144	623
Almacén	0	1.15	10	31
Baños (H y M)	0	2.35	15	23 / 20
Contabilidad	330	4.56	36	166
Dirección	300	3.99	36	157
Prácticas	0	3.34	1,026	2,403
SC_ADM	410	1.53	64	1,631
SCI	538	2.38	144	1,631
SC2	1,138	3.40	144	1,650

Nota: Elaboración propia (2025).

III. Sistemas de climatización

Las zonas SCI, SC2, SC_ADM, Administración, Contabilidad y Dirección están equipadas con minisplits individuales de expansión directa, operados de forma manual. Se asume un rango de consigna de 23 ± 2 °C, sin regulación automatizada. Las zonas Área de Prácticas, Baños y Almacén carecen de sistemas de climatización activa. Para efectos de simulación, los equipos de expansión directa fueron modelados con un Coefficient of Performance (COP) de 3.2, valor representativo para sistemas minisplit de eficiencia estándar en climas cálido-secos (ASHRAE, 2021; Said et al., 2019).

La puerta enrollable industrial al norte, en el área de prácticas, permanece abierta durante toda la jornada laboral. Esta condición fue modelada como apertura programada en DesignBuilder®, lo cual introduce una ganancia térmica directa por infiltración y convección en el espacio de mayor volumen y carga térmica del edificio.

IV. Síntesis operativa modelada

- Zonas climatizadas con carga interna elevada: SCI, SC2, SC_ADM
- Zonas operativas sin climatización: PRACT, BAÑOS, ALMACÉN
- Zonas de baja densidad, sin ventilación mecánica: BAÑOS, ALMACÉN
- Zonas con carga térmica relevante por ocupación: SC_ADM, SCI, SC2

Esta caracterización operativa permitió asignar perfiles térmicos específicos en el software de simulación, considerando ocupación, uso de equipos, iluminación, ventilación natural y límites térmicos por envolvente.

3.2.5 Zonificación térmica modelada vs. zonas no accesibles

El modelo energético desarrollado en DesignBuilder® se estructuró a partir de una zonificación térmica integral que incluyó la totalidad del edificio, diferenciando entre zonas activas, no habitadas y volúmenes colindantes. Esta estrategia permitió conservar la precisión geométrica y solar del modelo, asegurando la validez espacial del entorno construido y su comportamiento térmico global.

I. Volúmenes simulados térmicamente activos

La sección funcionalmente operativa del edificio, equivalente a 546.3 m², fue modelada como zona térmicamente activa, incorporando perfiles horarios específicos, cargas internas diferenciadas y condiciones reales de uso. Estas zonas comprenden:

- Aulas de capacitación climatizadas.
- Área administrativa y de dirección.
- Zona de prácticas técnicas sin acondicionamiento.
- Núcleo de baños y almacén.

Cada una fue definida como nodo térmico independiente, con propiedades operativas verificadas, tal como se documentó en los subapartados previos.

II. Volúmenes no habitados simulados sin carga térmica

Las zonas no modeladas corresponden a espacios periféricos fuera de la franja operativa evaluada, que no fueron monitoreados ni documentados técnicamente por una o más de las siguientes razones:

- Inaccesibilidad técnica o física: espacios cerrados, sin autorización de ingreso, sin visibilidad directa ni posibilidad de instalación de sensores.
- Indefinición funcional: áreas sin uso determinado, sin patrón de ocupación regular, o con función transitoria no replicable en simulación.
- Desconexión térmica: zonas no vinculadas físicamente al conjunto intervenido (sin puertas, flujos de aire, o continuidad espacial significativa).

Estas zonas fueron representadas en el entorno digital como volúmenes neutros o masas térmicamente inactivas, sin intercambio térmico con las zonas simuladas.

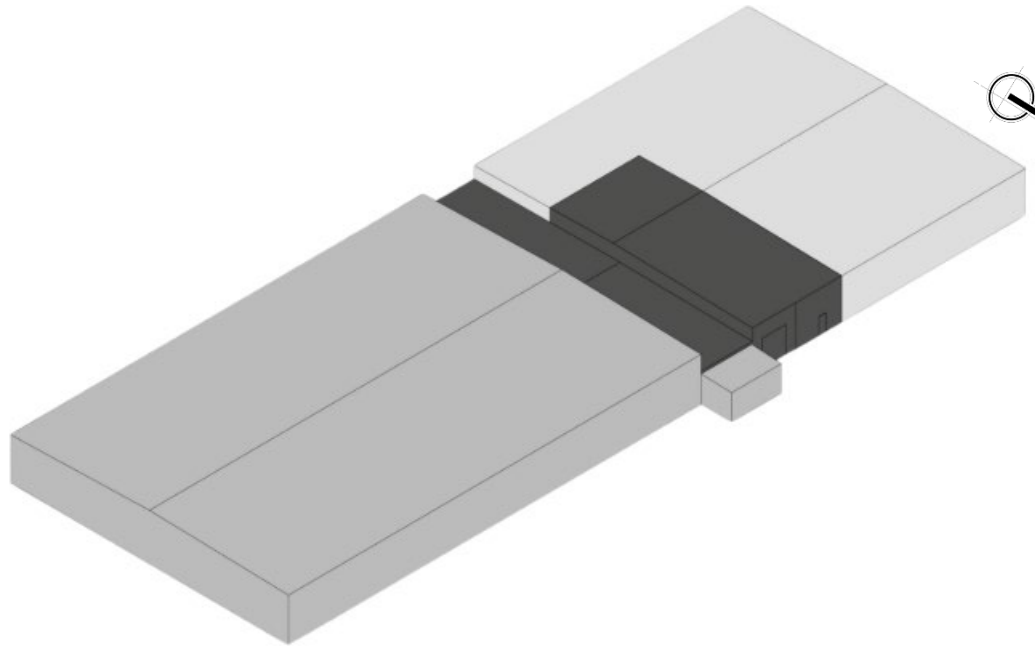
III. Volúmenes colindantes tratados como masas adiabáticas

Los cuerpos arquitectónicos adyacentes al edificio principal en particular los ubicados en la fachada este fueron modelados como volúmenes colindantes adiabáticos, sin propiedades térmicas ni condiciones internas, pero con geometría precisa y orientación correcta. Esta medida fue adoptada para conservar la exactitud en la simulación del sombreado proyectado sobre la envolvente, sin introducir cargas térmicas no verificadas.

Este enfoque permitió mantener la trazabilidad entre condiciones reales y parámetros simulados, al representar el edificio completo con zonificación térmica diferenciada. Las zonas no intervenidas o no monitoreadas fueron incluidas en el modelo como volúmenes geoméricamente consistentes (Figura 2), tratados térmicamente como masas adiabáticas, conforme a los lineamientos del motor de simulación.

Esta metodología es coherente con prácticas avanzadas de modelado energético (Crawley et al., 2005) y se alinea con la norma ISO 52016-1:2017, que permite la representación integral del edificio con asignación diferenciada de funciones térmicas, siempre que se justifique su tratamiento dentro de los límites del análisis térmico efectivo.

Figura 2. Modelo energético del volumen intervenido en DesignBuilder®.



Representación cromática	Tipo de volumen	Descripción técnica
■	Volumen simulado activo	Zona térmicamente activa, modelada con cargas internas, ocupación y condiciones reales de operación.
■	Volumen simulado no habitado	Zona sin ocupación ni cargas térmicas, modelada sin actividad energética pero incluida en el modelo como espacio inactivo.
■	Volumen colindante adiabático	Masa externa sin propiedades térmicas ni condiciones internas, utilizada para conservar la precisión geométrica y solar.

Nota: Elaboración propia (2025).

3.4 Instrumentación, monitoreo y análisis climático

3.4.1 Objetivo y enfoque del monitoreo

El procedimiento de instrumentación y monitoreo térmico aplicado en esta investigación tuvo como finalidad generar registros empíricos bajo condiciones reales de operación del edificio, que permitieran alimentar, ajustar y validar el modelo digital de simulación energética desarrollado. El diseño metodológico adoptado permitió documentar el comportamiento térmico de la envolvente y de los espacios interiores, caracterizar diferencias térmicas entre zonas funcionales con distintas condiciones de carga y climatización, así como registrar los gradientes térmicos en los elementos constructivos principales.

El monitoreo se estructuró bajo un enfoque observacional instrumental de campo, sin alterar las condiciones habituales de uso del inmueble durante el periodo de medición. La selección de los puntos de registro respondió a la zonificación funcional del edificio, las características geométricas de los muros y la cubierta, la exposición solar directa, y los resultados preliminares obtenidos mediante el levantamiento termográfico de diagnóstico. Las variables monitoreadas incluyeron temperatura del aire, humedad relativa y temperaturas superficiales de elementos constructivos expuestos.

El esquema operativo del monitoreo se organizó conforme a los lineamientos metodológicos sintetizados en la Tabla 17:

Tabla 17. Lineamientos técnicos de instrumentación térmica aplicada

Criterio técnico	Justificación metodológica
Ubicación de sensores	Zonas representativas por funcionalidad, carga térmica interna y exposición solar.
Variables registradas	Temperatura del aire, humedad relativa, temperatura superficial de muros y cubierta.
Periodo de monitoreo	25 días consecutivos durante el mes de mayo, bajo condiciones de clima cálido seco extremoso.
Frecuencia de registro	Intervalo constante de 15 minutos, compatible con el formato horario EPW y los parámetros de simulación de DesignBuilder®.

Criterio técnico	Justificación metodológica
Integración al modelo energético	Comparación directa con las salidas del modelo en temperatura operativa, aplicando los criterios de validación estadística establecidos.

Nota: Elaboración propia (2025).

El conjunto de registros obtenidos en esta fase constituyó la base empírica para los procesos de calibración, validación y ajuste de los parámetros térmicos aplicados posteriormente en el modelo digital de simulación.

3.4.2 Instrumentos de medición utilizados

El conjunto de instrumentos empleados en la presente investigación se seleccionó en función de sus características técnicas, capacidad de registro continuo, estabilidad operativa y compatibilidad con los procedimientos de monitoreo térmico en edificaciones. Cada dispositivo permitió documentar las variables térmicas requeridas para la posterior construcción, calibración y validación del modelo digital de simulación energética.

Las especificaciones técnicas de cada instrumento, así como su configuración operativa, se presentan a continuación de manera individualizada, integrando los parámetros de medición, rangos de precisión, intervalos de registro y capacidades de almacenamiento correspondientes.


3.4.2.1 Termohigrómetros Elitech RC-51H

Los dataloggers Elitech RC-51H fueron empleados para registrar temperatura del aire y humedad relativa en el interior del edificio, en distintos espacios funcionales, paramentos de muros interiores y zonas de interés térmico. Su instalación permitió documentar el comportamiento térmico horario de las distintas zonas ocupadas y expuestas, registrando variaciones tanto en espacios climatizados como no climatizados.

La elección de estos dispositivos obedeció a su capacidad de registro continuo, estabilidad de lectura, precisión certificada y facilidad de instalación en puntos múltiples. Los datos generados por estos sensores constituyeron la base empírica principal para la validación térmica del modelo digital.

A continuación, se desarrollan las especificaciones del instrumento (Tabla 18):

Tabla 18. Especificaciones técnicas del datalogger Elitech RC-51H.

Instrumento	Parámetro técnico	Valor especificado
	Rango de temperatura	-40 °C a 85 °C
	Precisión de temperatura	±0.5 °C
	Resolución de temperatura	0.1 °C
	Rango de humedad relativa	10 % a 95 % RH
	Precisión de humedad relativa	±3 % RH
	Resolución de humedad relativa	0.1 % RH
	Intervalo de muestreo	15 minutos
	Capacidad de almacenamiento	32,000 registros
	Protección	IP65


Fuente: METSA México. (2025). Datalogger de temperatura Elitech RC-51H. Recuperado de <https://www.metsa.mx/productos/elitech/dataloggers-de-temperatura-y-humedad/datalogger-de-temperatura-elitech-rc51h>

3.4.2.2 Registradores HOBO U12-013

El registrador HOBO U12-013 se utilizó para la medición de temperatura superficial de la cubierta interior. Para este fin, se conectaron dos sondas de contacto a los canales externos del equipo. Las sondas se fijaron directamente sobre la superficie metálica interior de la cubierta en puntos definidos a partir del análisis térmico preliminar, con el propósito de registrar de forma precisa las condiciones de acumulación térmica superficial bajo carga térmica real.

A continuación, se plantean las especificaciones del instrumento (Tabla 19):

Tabla 19. Especificaciones técnicas del registrador HOBO U12-013.

Instrumento	Parámetro técnico	Valor especificado
	Rango de temperatura (sensor externo)	-20 °C a 70 °C
	Precisión de temperatura	±0.35 °C (0 °C a 50 °C)
	Resolución de temperatura	0.03 °C
	Rango de humedad relativa	5% a 95% RH
	Precisión de humedad relativa	±2.5% (10% a 90% RH)
	Resolución de humedad relativa	0.05%
	Puertos externos	2 canales disponibles
	Intervalo de muestreo	15 minutos
	Capacidad de almacenamiento	43,000 registros

Fuente: GALK México. (2025). Registrador de datos HOBO U12-013. Recuperado de <http://galk.com.mx/u12-013>

3.4.2.3 Cámara termográfica FLIR C5

La cámara infrarroja FLIR C5 se utilizó durante la fase preliminar de diagnóstico térmico para caracterizar el comportamiento superficial de la envolvente bajo condiciones reales de carga térmica. Su aplicación permitió identificar zonas con acumulación diferencial de calor, localizar concentraciones térmicas críticas y visualizar gradientes superficiales tanto en muros exteriores como interiores.

Además, permitió detectar puentes térmicos, discontinuidades constructivas y puntos vulnerables a ganancias térmicas elevadas. Los resultados obtenidos en esta fase determinaron los criterios técnicos empleados para definir la ubicación precisa de los sensores fijos en la etapa de monitoreo continuo.

A continuación, se mencionan las especificaciones del instrumento (Tabla 19):

Tabla 20. Especificaciones técnicas de la cámara infrarroja FLIR C5.

Instrumento	Parámetro técnico	Valor especificado
	Rango de temperatura de medición	-20 °C a 400 °C
	Precisión	±3 °C (0–100 °C), ±3 % (100–400 °C)
	Sensibilidad térmica (NETD)	<70 mK
	Resolución de imagen térmica	160 × 120 px
	Cámara digital	5 MP
	Frecuencia de imagen	8.7 Hz
	Rango espectral	8–14 μm
	Modos de imagen	IR, visual, MSX, imagen en imagen
	Almacenamiento	Memoria interna y nube (FLIR Ignite)
	Protección ambiental	IP54

Fuente: FLIR Systems. (2025). FLIR C5 - Compact Thermal Camera. Recuperado de <https://www.flir.com.mx/products/c5/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>

3.4.2.4 Sistema auxiliar de monitoreo climático exterior

El monitoreo climático exterior se efectuó mediante un sistema auxiliar compuesto por un datalogger Elitech RC-51H, configurado para registrar temperatura ambiente y humedad relativa en el entorno inmediato del edificio objeto de estudio. Este dispositivo no corresponde a una estación meteorológica automática convencional, pero cumple la función instrumental de caracterizar las condiciones microclimáticas locales de referencia durante el periodo de monitoreo térmico.

Para garantizar la precisión de los registros frente a la radiación solar directa, se integró un escudo de radiación pasiva diseñado específicamente para el monitoreo ambiental de campo. El escudo consistió en un conjunto de discos protectores concéntricos de material reflectante, espaciados verticalmente mediante separadores

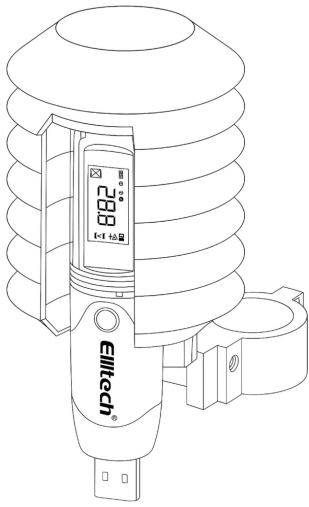
de baja conductividad térmica. Esta configuración permitió el libre flujo de aire y redujo el calentamiento radiante sobre el sensor.

El sistema se instaló sobre un mástil independiente, separado del edificio y de superficies reflejantes, a una altura aproximada de 2.00 metros sobre el nivel de terreno. La instalación se realizó conforme a los lineamientos técnicos establecidos en la norma ISO 7726:1998 (Ergonomía de los ambientes térmicos), complementados con los criterios de instalación en campo abierto recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (WMO No. 8, 2018). Esta configuración minimizó las interferencias locales de radiación reflejada y permitió obtener registros térmicos representativos de la carga ambiental efectiva sobre la envolvente durante el periodo de monitoreo.

Los datos obtenidos mediante este sistema auxiliar definieron la condición térmica de referencia exterior durante la campaña de medición y sirvieron como insumo empírico para la validación térmica del modelo digital.

A continuación, se desarrollan las especificaciones del instrumento (Tabla 21):

Tabla 21. Especificaciones técnicas del sistema auxiliar de monitoreo climático exterior.

Instrumento	Parámetro técnico	Valor especificado
	Rango de temperatura	-40 °C a 85 °C
	Precisión de temperatura	±0.5 °C
	Resolución de temperatura	0.1 °C
	Rango de humedad relativa	10 % a 95 % RH
	Precisión de humedad relativa	±3 % RH
	Resolución de humedad relativa	0.1 % RH
	Intervalo de muestreo	15 minutos
	Capacidad de almacenamiento	32,000 registros
	Protección	IP65

Instrumento	Parámetro técnico	Valor especificado
Sistema de montaje	Altura de instalación	2.00 m sobre nivel de terreno
Protección de sensor	Tipo de escudo	Escudo de radiación pasiva tipo multianillo
Normativa aplicada	Normas de referencia	ISO 7726:1998, WMO No. 8 (2018)

Nota: Elaboración propia (2025).

3.4.3 Ubicación estratégica de sensores (criterios técnicos y normativos)

El esquema de instrumentación térmica se desplegó conforme a la zonificación funcional y constructiva del edificio, bajo las condiciones metodológicas ya descritas en los apartados anteriores. La ubicación de los sensores respondió al objetivo de capturar los gradientes térmicos de interés en los distintos elementos constructivos, integrando los lineamientos normativos de las normas ISO 7726:1998, ISO 9869-1:2014 y WMO No. 8 (2018).

A continuación, se documenta la disposición espacial de los sensores instalados durante el periodo de monitoreo (Tabla 22):

Tabla 22. Nomenclatura y ubicación de los sensores térmicos instalados.

Nomenclatura	Descripción del sensor	Ubicación física	Tipo de medición
TAI	Temperatura ambiente interior	Área de prácticas	Aire interior
TAE	Temperatura ambiente exterior	Sistema auxiliar exterior	Aire exterior
MNE	Muro norte exterior	Fachada norte exterior	Superficie de muro
MNI	Muro norte interior	Fachada norte interior	Superficie de muro
ADM-N	Administración muro norte	Zona administrativa (muro norte)	Superficie de muro
ADM	Administración	Zona administrativa (aire interior)	Aire interior
SCI-N	Sala de capacitación 1 muro norte	Sala de capacitación 1 (muro norte)	Superficie de muro

SCI	Sala de capacitación 1	Sala de capacitación 1 (aire interior)	Aire interior
SC2-O	Sala de capacitación 2 muro oeste	Sala de capacitación 2 (muro oeste)	Superficie de muro
TME	Muro este	Área de prácticas (muro este)	Superficie de muro
TMS	Muro sur	Área de prácticas (muro sur)	Superficie de muro
TT	Cubierta metálica interior	Área de prácticas (cubierta interior)	Temperatura superficial (HOBO)

Nota: Elaboración propia (2025).

La definición de los puntos de monitoreo térmico consideró tanto las características geométricas del edificio como los lineamientos normativos aplicables al emplazamiento de sensores en estudios de campo. Cada posición fue seleccionada para representar las condiciones térmicas predominantes en los elementos de la envolvente y en los espacios interiores, evitando distorsiones por interferencias físicas, corrientes de aire o reflexiones térmicas no representativas. Los criterios específicos de instalación adoptados para cada grupo de sensores se sintetizan en la tabla siguiente.

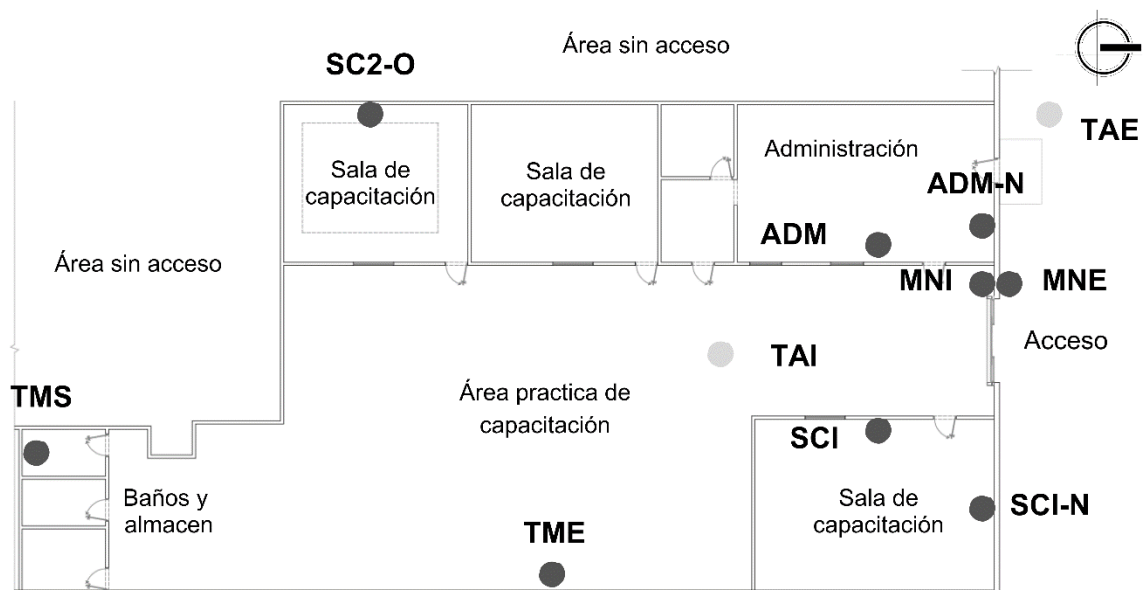
Tabla 23. Criterios normativos y técnicos de emplazamiento de sensores.

Sensor	Altura o posición de instalación	Norma aplicada	Consideración operativa
Sensores de aire interior (TAI, SCI, ADM)	1.20 m sobre nivel de piso terminado	ISO 7726:1998	Nivel representativo del volumen de aire interior, fuera de corrientes directas de aire y zonas de tránsito
Sensores de superficie en muros (MNE, MNI, ADM-N, SCI-N, SC2-O, TMS, TME)	Centro geométrico vertical de cada muro	ISO 9869-1:2014	Captura del gradiente térmico representativo del elemento constructivo
Sensores de superficie en cubierta interior (TT) (HOBO)	Contacto directo sobre la lámina metálica interior	ISO 9869-1:2014	Puntos definidos a partir del análisis termográfico preliminar
Sensor auxiliar exterior (TAE)	2.00 m sobre nivel de terreno, separado del edificio y superficies	ISO 7726:1998 / WMO No. 8	Reducción de interferencias por radiación reflejada y distorsión térmica local

Nota: Elaboración propia (2025).

La representación gráfica de la distribución instrumental corresponde al esquema de ubicación de los sensores desplegados durante el periodo de monitoreo térmico. El diagrama integra la totalidad de los puntos de medición establecidos conforme a la zonificación térmica, las orientaciones geométricas de la envolvente y los criterios normativos de emplazamiento previamente documentados. Esta representación permite visualizar la disposición espacial de cada sensor respecto a los elementos constructivos monitorizados (Figura 3).

Figura 3. Esquema de ubicación de sensores térmicos instalados.



Nota: Elaboración propia (2025).

3.4.4 Periodo de monitoreo, días críticos y cobertura temporal

El monitoreo térmico se desarrolló durante un periodo continuo de 25 días dentro del mes de mayo, seleccionado por representar condiciones ambientales extremas características del clima cálido seco de Mexicali, Baja California. Este

periodo permitió capturar variaciones térmicas diarias bajo operación habitual del edificio y generó registros empíricos representativos de las cargas térmicas aplicadas durante los procesos de validación y calibración del modelo digital.

Los registros se efectuaron con una frecuencia de muestreo constante de 15 minutos. La sincronización horaria se mantuvo compatible con el formato climático EPW utilizado en la simulación energética. La continuidad de la serie permitió establecer un perfil térmico completo y delimitar los días de mayor carga térmica durante el periodo.

Dentro del conjunto de datos registrados, el día 16 de mayo fue seleccionado como día crítico de validación. Esta elección obedeció a su correspondencia con los criterios definidos para la identificación de picos térmicos representativos, se consideró la temperatura exterior máxima, las condiciones operativas internas y la estabilidad ambiental.

Las características registradas durante este día crítico se presentan en la Tabla 24:

Tabla 24. Parámetros térmicos representativos del día crítico seleccionado (16 de mayo).

Variable	Valor registrado
Temperatura exterior máxima (°C)	46.3
Temperatura exterior mínima (°C)	16.2
Humedad relativa máxima (%)	83
Humedad relativa mínima (%)	11.7
Condiciones de ocupación	Operación normal (día laboral)
Fenómenos meteorológicos atípicos	No registrados

Nota: Elaboración propia (2025).

3.4.5 Levantamiento termográfico

El levantamiento termográfico diagnóstico constituyó una fase instrumental previa al montaje definitivo de los sensores de monitoreo térmico continuo, dentro de la estrategia de caracterización física de la envolvente. Esta etapa fue fundamental para identificar las zonas de mayor vulnerabilidad térmica superficial, determinar los gradientes térmicos diferenciales en condiciones de operación real y establecer los puntos de ubicación óptima de los sensores fijos empleados posteriormente en el monitoreo prolongado.

La metodología aplicada se sustentó en los lineamientos de inspección térmica de edificación establecidos por la norma ISO 6781:2003, complementados con los procedimientos generales de diagnóstico por termografía de la norma ISO 18434-1:2008.

El levantamiento termográfico se realizó en abril, antes del inicio de las temperaturas máximas propias del clima cálido seco extremo de Mexicali. Esto permitió identificar diferencias térmicas en la envolvente antes de que el calor acumulado durante el verano homogeneizara las temperaturas superficiales. La programación también respondió a la disponibilidad de acceso a las instalaciones, lo que permitió ejecutar el diagnóstico sin interferir en las actividades operativas del caso de estudio.

3.4.5.1 Protocolo de captura e instrumentación

El levantamiento se realizó durante una jornada continua de campo. Las capturas se organizaron en dos bloques horarios: matutino, a las 08:00 horas, y vespertino, a las 16:00 horas. Antes de cada bloque, se respetó un intervalo mínimo de estabilización térmica de veinte minutos para permitir el ajuste radiométrico de las superficies expuestas.

Las mediciones se realizaron bajo cielo despejado, sin nubosidad visible, sin viento significativo y con baja humedad relativa.

La distancia de captura se mantuvo dentro del rango recomendado por el fabricante, entre 1.0 y 2.0 metros, para evitar dispersión radiométrica por atenuación atmosférica o desviación angular.

La cámara utilizada fue una FLIR C5 con certificado de calibración vigente, emitido por laboratorio acreditado, lo que garantizó la trazabilidad de las mediciones. Los parámetros de emisividad se ajustaron manualmente para cada superficie conforme al tipo de material.

A continuación, se presenta la tabla de configuración de emisividad aplicada durante el levantamiento (Tabla 25):

Tabla 25. Configuración de emisividad aplicada

Superficie	Material predominante	Emisividad
Cubierta horizontal interior	Lámina galvanizada	0.80
Frente vertical de cubierta Este	Lámina galvanizada	0.80
Fachada norte - operativa	Revestimiento pintado mate	0.95
Fachada norte - administrativa (puerta metálica)	Acero pintado	0.85

Nota: Conforme a ISO 18434-1:2008, ISO 6781:2003 y especificaciones técnicas del fabricante FLIR Systems (2024). Elaboración propia (2025).

Esta configuración permitió documentar los gradientes térmicos superficiales con precisión radiométrica dentro de los márgenes operativos recomendados por el fabricante y las normas aplicadas.

3.4.5.2 Registros térmicos obtenidos

Durante el levantamiento termográfico se obtuvieron registros superficiales sistemáticos en los cuatro sectores constructivos definidos para el diagnóstico:

cubierta horizontal interior, frente vertical de cubierta Este, fachada norte operativa y fachada norte administrativa. Las capturas se realizaron en los dos bloques horarios programados (08:00 h y 16:00 h), lo que permitió documentar los rangos máximos y mínimos de temperatura superficial bajo distintas condiciones de exposición térmica.

Aunque se realizaron capturas complementarias en otras zonas del inmueble, la selección de estos cuatro frentes responde a su relevancia térmica en el balance global de la envolvente y su aporte directo en la definición de los criterios técnicos para la ubicación de sensores fijos. La ubicación definitiva de los instrumentos de monitoreo continuo consideró, además de estos registros termográficos, los parámetros funcionales, de accesibilidad y de distribución térmica identificados durante la caracterización integral del edificio.

A continuación, se presentan los registros térmicos documentados (Tabla 26):

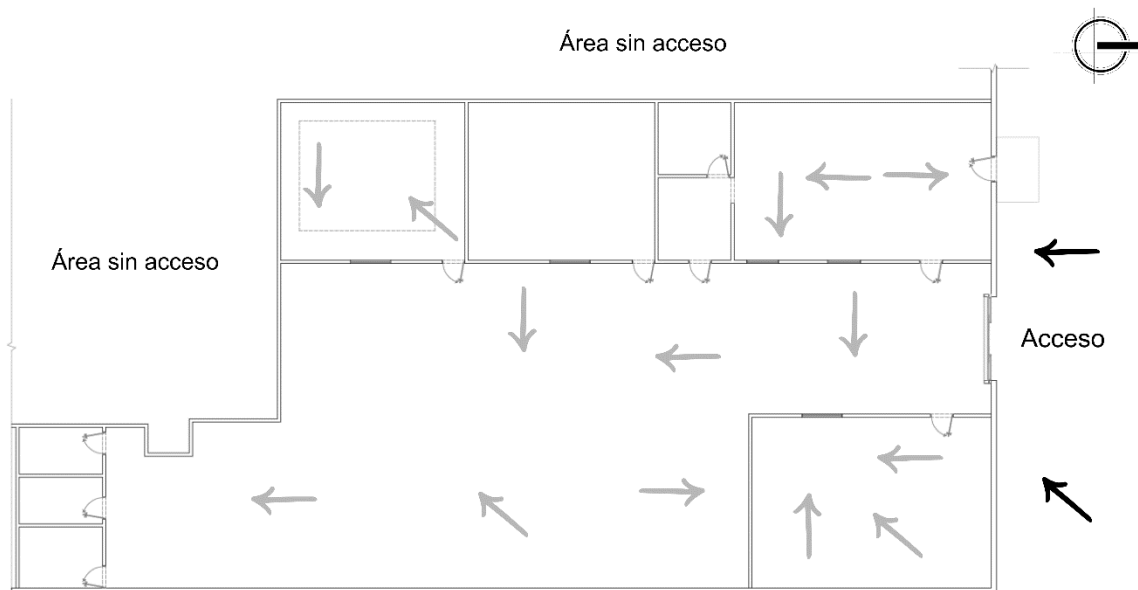
Tabla 26. Registros térmicos superficiales por sector y horario de captura.

Sector inspeccionado	Horario	Registro térmico (°C)
Cubierta horizontal interior (área de prácticas)	08:00 h	Máx.: 32.0 / Mín.: 19.3
	16:00 h	Máx.: 33.7 / Mín.: 23.4
Frente vertical de cubierta Este	08:00 h	Máx.: 42.7 / Mín.: 23.8
	16:00 h	Máx.: 34.7 / Mín.: 25.1
Fachada norte operativa	08:00 h	Máx.: 26.1 / Mín.: 18.4
	16:00 h	Máx.: 29.6 / Mín.: 23.5
Fachada norte administrativa (acceso metálico)	08:00 h	Máx.: 14.8 / Mín.: 12.5
	16:00 h	Máx.: 21.9 / Mín.: 20.4

Nota: Elaboración propia (2025).

La Figura X muestra la ubicación espacial de los puntos de captura realizados durante la inspección diagnóstica (Figura 4).

Figura 4. Plano esquemático de ubicación de registros termográficos.



Nota: Se indican todos los puntos de captura termográfica realizados durante el levantamiento diagnóstico. Los sectores destacados corresponden a los registros representativos analizados en el presente apartado. Elaboración propia (2025).

Los registros instrumentales evidenciaron gradientes térmicos diferenciados entre los sectores inspeccionados. Los contrastes máximos se localizaron en la cubierta metálica (plano horizontal y frente vertical Este), mientras que las fachadas norte mostraron variaciones térmicas de menor magnitud, en correspondencia con su reducida exposición directa a radiación solar.

A partir de estos registros se desarrolla el diagnóstico térmico individualizado por sector, conforme a los datos obtenidos durante los bloques horarios establecidos.

3.4.5.3 Diagnóstico térmico por sección

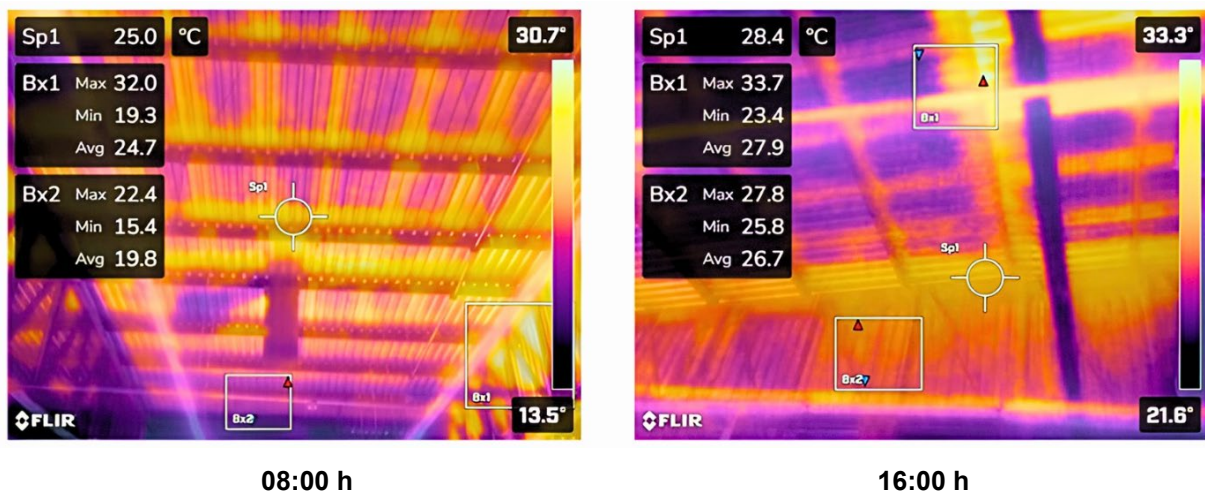
El análisis térmico individualizado de los sectores inspeccionados se presenta a continuación, con base en los registros instrumentales capturados durante los bloques horarios programados.

- I. Cubierta horizontal interior (área de prácticas)

Durante el bloque matutino se registraron gradientes térmicos diferenciados sobre la superficie interior de la cubierta metálica. Las zonas superiores expuestas (Bx1) alcanzaron máximos de 32.0 °C, mientras que las zonas parcialmente sombreadas (Bx2) presentaron mínimos de 15.4 °C, reflejando la rápida respuesta térmica de la lámina metálica ante la radiación solar incidente en las primeras horas del día.

En el bloque vespertino, la carga térmica acumulada durante la jornada redujo el diferencial superficial, alcanzándose máximos de 33.7 °C (Bx1) y 27.8 °C (Bx2) (Figura 5).

Figura 5. Registros termográficos representativos – Cubierta horizontal interior (área de prácticas).



Horario	Zona	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
08:00 h	Bx1	32.0	19.3
08:00 h	Bx2	22.4	15.4
16:00 h	Bx1	33.7	23.4
16:00 h	Bx2	27.8	25.8

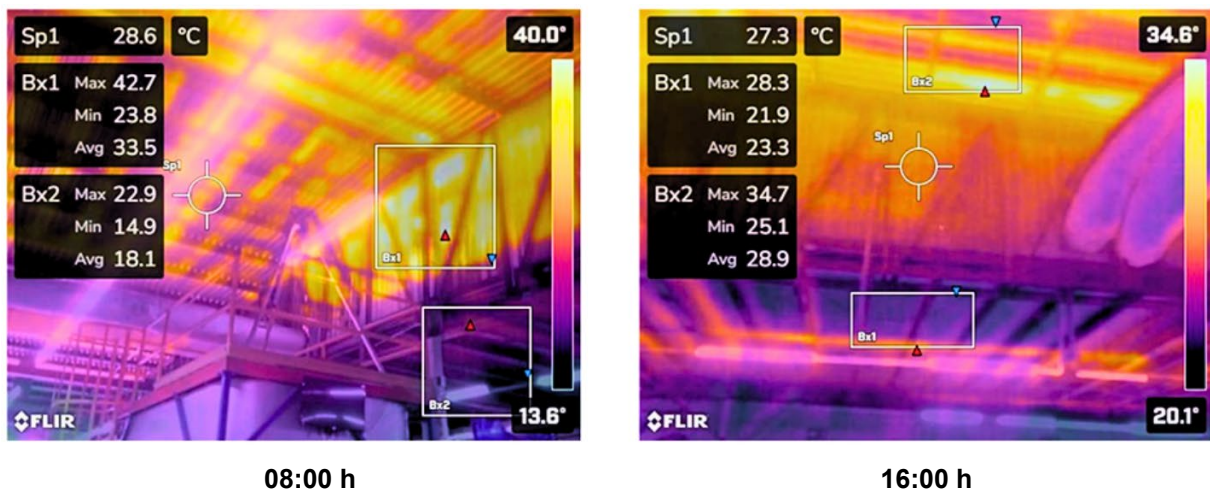
Nota: Elaboración propia (2025).

II. Frente vertical de cubierta Este

En el bloque matutino se registraron gradientes térmicos amplios debido a la exposición directa. Las zonas superiores (Bx1) alcanzaron máximos de 42.7 °C, mientras que las inferiores (Bx2) presentaron mínimos de 14.9 °C.

Durante el bloque vespertino, la redistribución térmica por variación angular de la radiación redujo el diferencial, registrándose 34.7 °C (Bx2) y 28.3 °C (Bx1) (Figura 6).

Figura 6. Registros termográficos representativos – Frente vertical de cubierta Este.



Horario	Zona	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
08:00 h	Bx1	42.7	23.8
08:00 h	Bx2	22.9	14.9
16:00 h	Bx1	28.3	21.9
16:00 h	Bx2	34.7	25.1

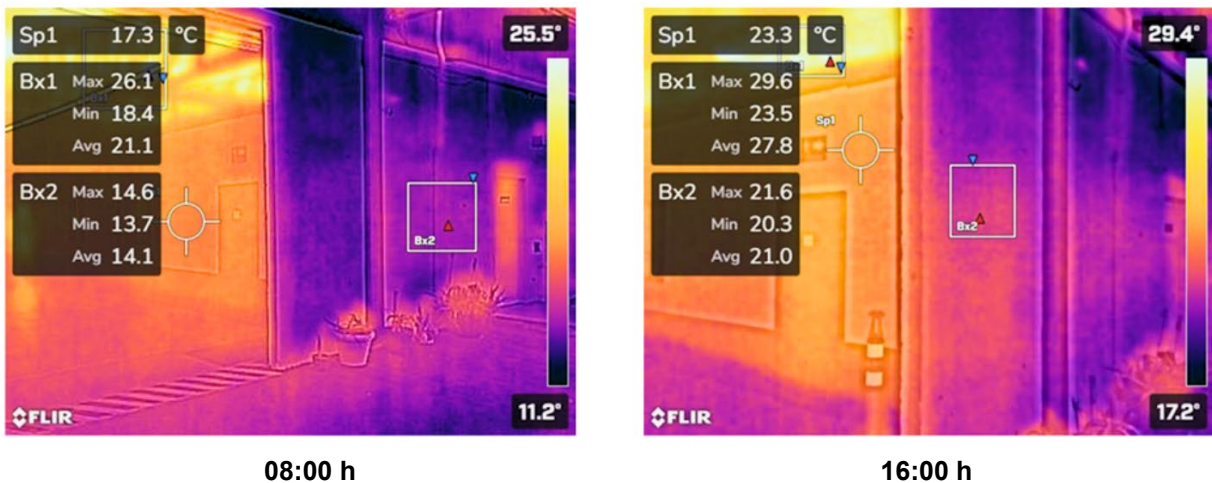
Nota: Elaboración propia (2025).

III. Fachada norte operativa

En el bloque matutino los gradientes fueron moderados, con máximos de 26.1 °C (Bx1) y mínimos de 13.7 °C (Bx2), consistentes con la baja exposición solar directa.

Durante la tarde, el incremento por acumulación térmica elevó los registros a 29.6 °C (Bx1) y 21.6 °C (Bx2) (Figura 7).

Figura 7. Registros termográficos representativos – Fachada norte operativa.



Horario	Zona	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
08:00 h	Bx1	26.1	18.4
08:00 h	Bx2	14.6	13.7
16:00 h	Bx1	29.6	23.5
16:00 h	Bx2	21.6	20.3

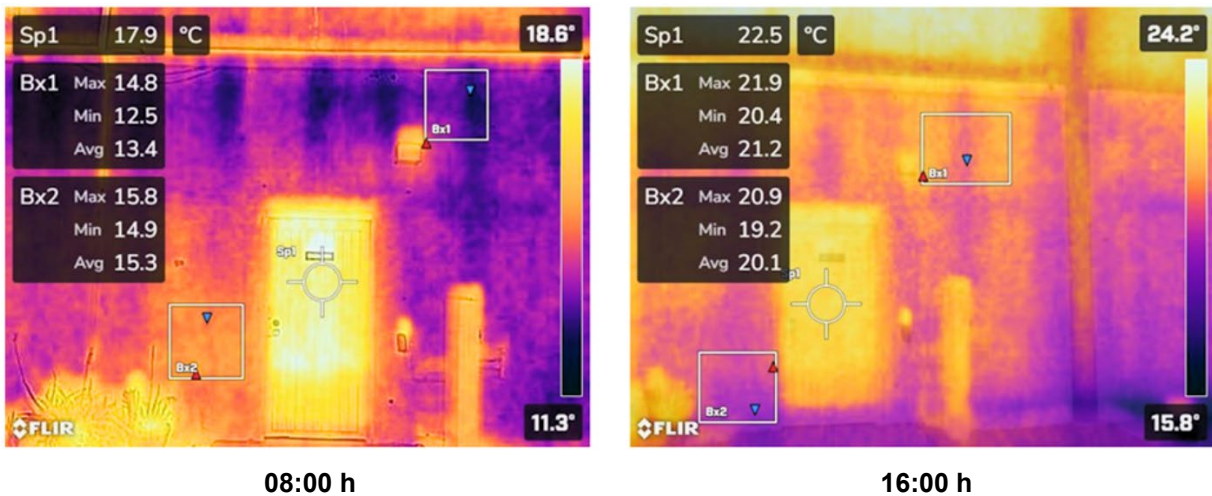
Nota: Elaboración propia (2025).

IV. Fachada norte administrativa (acceso metálico)

Durante el bloque matutino se registraron gradientes reducidos, con máximos de 14.8 °C (Bx1) y mínimos de 14.9 °C (Bx2), reflejando una mínima carga térmica inicial.

En el bloque vespertino, el ascenso térmico moderado alcanzó 21.9 °C (Bx1) y 20.9 °C (Bx2), manteniéndose diferencias mínimas entre zonas expuestas y sombreadas (Figura 8).

Figura 8. Registros termográficos representativos – Fachada norte administrativa (acceso metálico).



Horario	Zona	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
08:00 h	Bx1	14.8	12.5
08:00 h	Bx2	15.8	14.9
16:00 h	Bx1	21.9	20.4
16:00 h	Bx2	20.9	19.2

Nota: Elaboración propia (2025).

Con los registros instrumentales documentados durante el levantamiento termográfico se consolidó la caracterización superficial de la envolvente, sirviendo como base diagnóstica para la definición de puntos de instrumentación y el desarrollo de las siguientes fases del estudio.

3.4.6 Análisis climático histórico

El análisis climático histórico constituyó una etapa de referencia fundamental para la configuración de los escenarios de simulación energética aplicados en el objeto de estudio. Con este propósito se utilizó un archivo climático horario en formato EPW (EnergyPlus Weather File), correspondiente a la estación meteorológica de Mexicali, Baja California.

El archivo EPW empleado fue suministrado bajo la denominación MEXICALI_INTL_Aeropuerto M7.epw, construido como un Año Climático Típico (TMY). Este tipo de archivo no representa un año calendario específico, sino que integra secuencias horarias representativas elaboradas a partir de registros multianuales mediante técnicas de estadística robusta, con el objetivo de sintetizar condiciones promedio de operación térmica en la localidad. La información base considera series históricas comprendidas, de manera agregada, dentro del rango de años 1990 a 2020, siendo procesada bajo criterios de normalización aceptados en simulación energética dinámica.

Las principales variables climáticas extraídas del archivo EPW y procesadas para el análisis estadístico general se presentan en la Tabla:

Tabla 27. Estadísticos climáticos representativos — Archivo EPW TMY Mexicali.

Variable	Media	Mínimo	Máximo
Temperatura exterior seca (°C)	24.34	2.7	47.1
Humedad relativa (%)	50.16	14.0	100.0
Radiación global horizontal (Wh/m ²)	213.64	0.0	1124.0
Radiación directa normal (Wh/m ²)	227.42	0.0	1011.0
Radiación difusa horizontal (Wh/m ²)	75.30	0.0	509.0
Velocidad del viento (m/s)	3.16	0.0	12.9

Nota: A partir de datos del archivo climático en formato EPW para Mexicali, Baja California. Elaboración propia (2025).

El archivo EPW procesado constituye la referencia climática base para el desarrollo de los escenarios de simulación energética dinámica en el software DesignBuilder®, bajo las condiciones ambientales características del clima cálido seco extremo de Mexicali.

3.5 Modelado energético en DesignBuilder®

El modelado digital del comportamiento térmico del edificio se realizó mediante el software DesignBuilder®, configurado bajo condiciones de simulación dinámica horaria, utilizando como insumo climático el archivo EPW validado previamente (apartado 3.4.6). Este apartado documenta la parametrización completa aplicada durante la construcción del modelo digital, sobre el cual se evaluaron posteriormente los escenarios de intervención.

3.5.1 Construcción geométrica del modelo.

El modelo geométrico fue construido en el entorno gráfico de DesignBuilder® versión 7.0.2.006, se emplearon los planos arquitectónicos, levantamientos dimensionales y validaciones de campo documentadas en la caracterización física (apartado 3.3). La geometría considera:

- Representación tridimensional completa del volumen activo.
- Inclusión de la envolvente térmica integral.
- Espesores geométricos fieles a los sistemas constructivos reales.

3.5.2 Lógica de zonificación térmica y nodos.

El modelo fue subdividido en zonas térmicas independientes que reflejan la distribución funcional y de cargas internas del edificio. Las zonas definidas se sintetizan en la Tabla 28:

Tabla 28. Zonificación térmica configurada en el modelo.

Zona térmica	Descripción funcional	Código interno de modelado
Z1	Sala de capacitación 1	SCI
Z2	Sala de capacitación 2	SC2
Z3	Sala de capacitación administrativa	SC_ADM
Z4	Área administrativa (incluye contabilidad y dirección)	ADM
Z5	Área de prácticas	PRA
Z6	Almacén	ALM
Z7	Núcleo de servicios sanitarios	BAN

Nota: Elaboración propia (2025).

La zonificación respetó las características físicas, los usos de ocupación y las conexiones interzonales existentes en el edificio real.

3.5.3 Propiedades termofísicas de la envolvente.

El modelo digital base fue configurado mediante la asignación directa de propiedades termofísicas verificadas, reflejando la condición constructiva original del edificio previo a la aplicación de estrategias pasivas. Cada elemento de la envolvente arquitectónica se modeló conforme a su composición material, espesores físicos y características térmicas representativas, documentadas a partir del levantamiento físico, fichas técnicas y literatura especializada.

La tabla 29, sintetiza la configuración completa aplicada en el escenario base validado, incorporada al software DesignBuilder® para las simulaciones térmicas correspondientes.

Tabla 29. Configuración termofísica aplicada al escenario base.

Elemento constructivo	Descripción aplicada	Espesor total	(W/m·K)	(kg/m ³)	(J/kg·K)	(ε)	(ρ)
-----------------------	----------------------	---------------	---------	----------------------	----------	-----	-----

Muros perimetrales	Block de concreto hueco de 15 cm (sin aplanado ni aislamiento)	0.15 m	1.11	800	920	0.90	0.50
Cubierta metálica	Lámina galvanizada simple	0.003 m	45.00	7850	500	0.85	0.30
Cerramientos interiores	Panel divisorio ligero (tablaroca sin aislante)	0.012 m	0.17	950	1090	0.90	0.60
Piso	Losa de concreto armado	0.10 m	1.40	2200	880	0.90	0.30

Nota: (W/m·K): conductividad térmica; (kg/m³): densidad; (J/kg·K): calor específico; (ε): emisividad; (ρ): reflectancia. Elaboración propia (2025).

Esta configuración se mantuvo constante en todas las simulaciones de escenarios, sirviendo como referencia térmica para la comparación de intervenciones pasivas bajo condiciones homogéneas de contorno.

3.5.4 Configuración operativa por zona (ocupación, iluminación, equipos).

La asignación de cargas internas al modelo digital se realizó mediante transferencia directa de los valores de ocupación, iluminación y cargas de equipos previamente caracterizados en el apartado 3.3.4, los cuales fueron obtenidos mediante registros instrumentales y observación directa durante el diagnóstico operativo del inmueble.

Para efectos de modelado, estos valores fueron incorporados en DesignBuilder® como densidades térmicas unificadas por zona, manteniendo la coherencia operativa real observada. La tabla 30, resume la parametrización de cargas internas transferida al modelo digital:

Tabla 30. Resumen de cargas internas parametrizadas en el modelo.

Zona funcional	Área (m ²)	Densidad de ocupación (pers/m ²)	Densidad térmica total (W/m ²)
Administración	58.8	0.07	623
Almacén	8.7	0.11	31
Baños (H y M)	6.4 c/u	0.16	23 / 20
Contabilidad	7.9	0.13	166
Dirección	9.0	0.11	157
Área de prácticas	307.6	0.06	2403
Sala Capacitación Adm. (SC_ADM)	41.7	0.38	1631
Sala Capacitación 1 (SCI)	60.5	0.26	1631
Sala Capacitación 2 (SC2)	42.3	0.38	1650

Nota: A partir de datos del archivo climático en formato EPW para Mexicali, Baja California. Elaboración propia (2025).

Esta parametrización permitió reflejar en el modelo las condiciones térmicas operativas observadas en el inmueble, manteniendo consistencia plena entre el diagnóstico físico y la simulación digital aplicada en los escenarios de intervención.

3.5.5 Configuración de ventilación natural y límites térmicos

La configuración de ventilación natural del modelo digital fue establecida en función de las condiciones físicas reales del inmueble, el cual carece de ventanas u otros vanos operables convencionales. El único elemento funcionalmente habilitado para el ingreso de aire exterior corresponde a la cortina enrollable ubicada en la fachada norte, la cual permanece abierta durante el horario operativo diario.

Dado que no existen salidas opuestas que permitan establecer un flujo cruzado, la ventilación en el modelo fue configurada como un ingreso unidireccional de aire exterior, controlado exclusivamente por el horario de operación del edificio. No se

aplicaron controles de apertura por diferencial térmico (ΔT), ni se habilitó ventilación interzonal activa, dado que no existen nodos efectivos de propagación interior.

La parametrización de ventilación y límites térmicos aplicada en el modelo base se presenta a continuación (Tabla 31):

Tabla 31. Configuración de ventilación y límites térmicos.

Parámetro	Configuración aplicada
Estrategia de ventilación	Ingreso unidireccional controlado por horario operativo
Apertura funcional disponible	Cortina enrollable norte habilitada
Control de apertura	Por perfil horario operativo
Ventilación interzonal	No habilitada
Renovación mínima de aire (ACH)	0.5
Límites térmicos por zona	Definidos por propiedades de envolvente

Nota: Los escenarios de intervención pasiva con aperturas adicionales son documentados en el apartado 3.6. Elaboración propia (2025).

3.6 Escenarios simulados

En este apartado se definen y documentan los escenarios pasivos de intervención energética aplicados al modelo base, simulados mediante DesignBuilder®. Se expone la lógica de formulación de estos escenarios, su codificación y organización en bloques estratégicos, así como la parametrización de cada intervención. Todo el proceso se lleva a cabo de acuerdo, a los marcos normativos internacionales. En particular, se siguen lineamientos del ASHRAE Handbook - Fundamentals y estándares como ASHRAE 90.1-2019, ISO 52016-1:2017 e ISO 6946:2017.

Se emplea el método de balance térmico horario para el cálculo de cargas, lo que asegura que las simulaciones cumplen con métodos de evaluación energética. Asimismo, se utilizaron datos climáticos horarios reales (archivo climático TMY) representativos de la localidad de estudio, siguiendo las recomendaciones de

ASHRAE de emplear archivos meteorológicos típicos internacionales para simulación energética.

A continuación, se detalla la estructuración de los escenarios, se incluye el sistema de codificación (EIM_01 a EIM_30), los criterios de diseño adoptados, la documentación técnica de cada grupo estratégico (propiedades de materiales, dispositivos y procedimientos de modelado), la descripción de escenarios combinados integra múltiples estrategias, así como una tabla maestra resumen de todos los escenarios propuestos. Finalmente, se enumeran las estrategias descartadas junto con la justificación técnica de su exclusión.

3.6.1 Codificación y criterios generales (EIM_01 a EIM_30).

Se estableció un código identificador (EIM_XX) para cada escenario de mejora pasiva, donde EIM significa "Estrategia de Intervención - Mexicali" aplicada al modelo base, seguido de un número correlativo de dos dígitos. Este código facilita la referencia cruzada y organización de los escenarios a lo largo del estudio. En total se definieron 30 escenarios (EIM_01 a EIM_30), se abarcan tanto intervenciones individuales por estrategia pasiva, como combinaciones integradas de varias estrategias (ver sección 3.6.3).

La clasificación metodológica de los escenarios según la técnica pasiva aplicada se presenta a continuación (Tabla 32):

Tabla 32. Clasificación metodológica de los escenarios por bloque estratégico.

Bloque Estratégico	Descripción de la Técnica Pasiva
(a) Protección solar y térmica	Limitar la radiación solar incidente y minimizar las ganancias térmicas a través de la envolvente.
(b) Amortiguamiento térmico	Incrementar la capacidad de la envolvente para atenuar y retardar el flujo de calor.
(c) Disipación de calor	Favorecer la expulsión del calor acumulado en el edificio, principalmente mediante ventilación natural u otros medios pasivos de enfriamiento convectivo.

Nota: Elaboración propia (2025).

Esta organización en bloques permite un análisis sistemático de cada tipo de técnica y sus contribuciones individuales al desempeño térmico del edificio.

Cada escenario individual dentro de un bloque modifica un solo factor o elemento pasivo de la edificación, se mantienen las demás variables constantes, lo que facilita la evaluación aislada de su efecto. Esta estrategia de asegura consistencia metodológica en el diseño experimental de las simulaciones, evita interacciones confusas y garantiza que las diferencias de desempeño entre escenarios se atribuyan exclusivamente a la estrategia aplicada. De este modo, la agrupación y codificación adoptadas proporcionan un marco coherente para el desarrollo de escenarios y posterior integración de estrategias.

3.6.2 Escenarios individuales por tipo de estrategia.

a) Protección solar y térmica (EIM_01 a EIM_10)

En este grupo de escenarios se propusieron intervenciones sobre las superficies expuestas de la envolvente, tanto en cubierta como en fachadas, mediante recubrimientos de alta reflectancia, dispositivos de sombreado pasivo e incorporación de acristalamientos en fachadas originalmente opacas. Las variantes de acristalamiento se definieron con distintos porcentajes de área de abertura sobre la superficie aplicada.

La tabla 33, presenta los diez escenarios correspondientes al bloque de protección solar y térmica. En cada caso se especifica el código del escenario, el tipo de estrategia aplicada, el elemento constructivo intervenido y una descripción técnica resumida de la estrategia pasiva evaluada.

Tabla 33. Descripción de escenarios de protección solar y térmica (EIM_01 a EIM_10).

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_01	Revestimiento	Cubierta	Aplicación de pintura reflectante blanca

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
	reflectante blanco	(externa)	sobre la cubierta metálica existente. Reflectancia solar incrementada de 0.30 a 0.85; emisividad térmica 0.90.
EIM_02	Revestimiento termocrómico	Cubierta (externa)	Incorporación de recubrimiento termocrómico con reflectancia variable: 0.80 en condiciones cálidas y 0.30 en condiciones frías; emisividad térmica 0.90.
EIM_07	Sombreado horizontal parcial (50 %)	Cubierta (externa)	Instalación de estructura fija de sombreado horizontal opaco, elevada 1.0 m sobre la cubierta, con cobertura aproximada del 50 % del área del espacio analizado.
EIM_08	Sombreado horizontal extensivo (75 %)	Cubierta (externa)	Instalación de estructura fija de sombreado horizontal opaco, elevada 1.0 m sobre la cubierta, con cobertura aproximada del 75 % del área del espacio analizado.
EIM_03	Acristalamiento (10 % área)	Frente vertical de cubierta (este)	Incorporación de acristalamiento fijo equivalente al 10 % del área del frente vertical este; vidrio simple transparente con transmitancia solar de 0.85.
EIM_04	Acristalamiento (20 % área)	Frente vertical de cubierta (este)	Incremento de superficie acristalada fija hasta el 20 % del área del frente vertical este; vidrio simple transparente con transmitancia solar de 0.85.
EIM_05	Acristalamiento (30 % área)	Frente vertical de cubierta (este)	Extensión de superficie acristalada fija hasta el 30 % del área del frente vertical este; vidrio simple transparente con transmitancia solar de 0.85.
EIM_06	Acristalamiento con control solar (20 % área)	Frente vertical de cubierta (este)	Instalación de acristalamiento fijo equivalente al 20 % del del área del frente vertical este; vidrio con transmitancia solar de 0.20, combinado con sombreado exterior fijo.
EIM_09	Sombreado vertical de fachada	Frente vertical de cubierta (este)	Montaje de pantalla vertical fija de sombreado, separada 1.0 m del plano exterior de la fachada este.
EIM_10	Alero fijo horizontal	Muro sur (fachada principal)	Instalación de alero horizontal fijo con saliente de 1.20 m sobre la fachada sur.

Nota: Elaboración propia (2025).

b) Amortiguamiento térmico (EIM_11 a EIM_19)

En este grupo de escenarios se incorporaron materiales aislantes convencionales sobre la envolvente existente, manteniendo la geometría original del modelo. Se definieron escenarios específicos para la cubierta y para los muros perimetrales, variando el tipo de aislante y su espesor aplicado.

La tabla 34, presenta los escenarios correspondientes a la cubierta, mientras que la tabla 35, documenta los escenarios de aislamiento en muros. En cada caso se especifica el código del escenario, el tipo de material aislante, el elemento intervenido y una descripción técnica resumida de la configuración aplicada.

Los escenarios EIM_11 a EIM_15 corresponden a la incorporación de materiales aislantes sobre o bajo la cubierta existente, varía el tipo de aislamiento, su espesor y su posición constructiva dentro del sistema de cubierta.

Tabla 34. Descripción de escenarios de amortiguamiento térmico en cubierta (EIM_11–EIM_15).

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_11	Poliuretano proyectado (5 cm)	Cubierta (externa)	Aplicación de espuma rígida de poliuretano de 5 cm de espesor sobre la superficie superior de la cubierta. Conductividad térmica 0.024 W/m·K.
EIM_12	Poliuretano proyectado (10 cm)	Cubierta (externa)	Aplicación de espuma rígida de poliuretano de 10 cm de espesor sobre la superficie superior de la cubierta. Conductividad térmica 0.024 W/m·K.
EIM_13	Fibra de vidrio (12.7 cm)	Cubierta (interna)	Instalación de colchón de fibra de vidrio de 12.7 cm de espesor bajo el panel metálico de cubierta. Conductividad térmica 0.040 W/m·K.
EIM_14	Celulosa proyectada (10 cm)	Cubierta (interna)	Aplicación de celulosa proyectada de 10 cm de espesor sobre la superficie interior de la cubierta. Conductividad térmica 0.038 W/m·K; capacidad calorífica 2100 J/kg·K.

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_15	Poliestireno expandido (EPS, 3.8 cm)	Cubierta (externa)	Colocación de paneles rígidos de EPS de 3.8 cm de espesor sobre la superficie superior de la cubierta. Conductividad térmica 0.035 W/m·K (valor promedio).

Nota: Elaboración propia (2025).

Los escenarios EIM_16 a EIM_19 representan la aplicación de aislamientos adicionales en los muros perimetrales, se diferencia entre sistemas exteriores tipo EIFS y trasdosados interiores con cámaras rellenas de aislamiento.

Tabla 35. Descripción de escenarios de amortiguamiento térmico en muros perimetrales (EIM_16–EIM_19).

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_16	Poliestireno expandido (2.5 cm)	Muro perimetral (fachadas, exterior)	Aplicación de placas de EPS de 2.5 cm sobre la cara exterior de los muros perimetrales mediante sistema EIFS. Conductividad térmica 0.035 W/m·K.
EIM_17	Poliestireno expandido (7.5 cm)	Muro perimetral (fachadas, exterior)	Aplicación de placas de EPS de 7.5 cm sobre la cara exterior de los muros perimetrales mediante sistema EIFS. Conductividad térmica 0.035 W/m·K.
EIM_18	Celulosa inyectada (5 cm)	Muro perimetral (interior)	Inyección de celulosa compactada al 100 % en cámara de 5 cm conformada por trasdosado interior ligero. Conductividad térmica 0.038 W/m·K; capacidad calorífica 2100 J/kg·K.
EIM_19	Celulosa inyectada (10 cm)	Muro perimetral (interior)	Inyección de celulosa compactada al 100 % en cámara de 10 cm conformada por trasdosado interior ligero. Conductividad térmica 0.038 W/m·K; capacidad calorífica 2100 J/kg·K.

Nota: Elaboración propia (2025).

c) Disipación de calor.

En este grupo de escenarios se incorporaron estrategias pasivas destinadas a la disipación de calor acumulado en el edificio, sobre la base del modelo validado. Las intervenciones incluyen ventilación natural mediante aberturas operables en el frente vertical de cubierta (orientación este) y dispositivos de extracción térmica ubicados en cubierta o fachadas. Se definieron escenarios diferenciados por porcentaje de abertura, periodos de operación y tipo de dispositivo pasivo aplicado.

Los escenarios EIM_20 a EIM_26 corresponden a la incorporación de aberturas operables en el frente vertical de cubierta (orientación este), bajo distintas configuraciones de porcentaje de área abierta y franjas horarias de operación (Tabla 36).

Tabla 36. Descripción de escenarios de ventilación natural por aberturas operables (EIM_20–EIM_26)

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_20	Aperturas operables 10 % (ventilación diurna)	Frente vertical de cubierta (este)	Incorporación de aberturas operables equivalentes al 10 % del área del frente acristalado este, activadas durante el día. La configuración base mantiene vidrio de transmitancia solar 0.20 y sombreado fijo (como en EIM_06)
EIM_21	Aperturas operables 20 % (ventilación diurna)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 20 % del área del frente acristalado este, activadas durante el día. Mantiene las mismas características de acristalamiento y sombreado que EIM_06
EIM_22	Aperturas operables 40 % (ventilación diurna)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 40 % del área del frente acristalado este, activadas durante el día
EIM_23	Aperturas operables 60 % (ventilación diurna)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 60 % del área del frente acristalado este, activadas durante el día
EIM_24	Aperturas operables 40 % (ventilación nocturna)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 40 % del área del frente acristalado este, activadas durante la noche

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_25	Aperturas operables 60 % (ventilación nocturna)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 60 % del área del frente acristalado este, activadas durante la noche
EIM_26	Aperturas operables 40 % (ventilación continua 24 h)	Frente vertical de cubierta (este)	Aperturas operables equivalentes al 40 % del área del frente acristalado este, activadas de forma continua durante el día y la noche

Nota: Elaboración propia (2025).

Los escenarios EIM_27 a EIM_30 incorporan dispositivos pasivos de disipación térmica localizados en cubierta y fachadas. Cada variante aplica mecanismos convectivos diferenciados, mediante gradientes de presión, diferencias térmicas o extracción superior de aire caliente (Tabla 37).

Tabla 37. Descripción de escenarios de disipación de calor mediante dispositivos pasivos en cubierta y fachadas (EIM_27 a EIM_30).

ID	Tipo de estrategia pasiva	Elemento intervenido	Descripción técnica de la intervención
EIM_27	Chimenea solar pasiva	Cubierta (salida superior)	Implementación de chimenea solar vertical con sección aproximada de 1 m ² , conectada al interior alto de la nave. Interior pintado en color negro para favorecer el calentamiento y generar corriente ascendente de aire.
EIM_28	Extractores eólicos	Cubierta (salidas puntuales)	Instalación de extractores eólicos giratorios (turbinas) distribuidos en la cubierta, aprovechando viento y convección natural. Configuración de referencia: 4 unidades de Ø600 mm.
EIM_29	Rejillas de ventilación fija	Fachadas (superiores)	Incorporación de rejillas permanentes de ventilación en la parte superior de muros perimetrales, con área equivalente al 5 % de la superficie de fachada.
EIM_30	Tragaluces ventilados	Cubierta (claraboyas)	Adaptación de tragaluces abatibles en cubierta para funcionamiento como exutorios superiores. Configuración base: paneles transparentes de 1 m ² de área unitaria.

Nota: Elaboración propia (2025).

3.6.2.1 Propiedades termo-físicas de materiales y componentes simulados

La tabla 38, documenta las propiedades termo-físicas y ópticas asignadas a los materiales y sistemas pasivos aplicados en los escenarios EIM_01 a EIM_30. Estos valores constituyeron los insumos fundamentales para la configuración de materiales, superficies y dispositivos dentro del modelo energético implementado en DesignBuilder®. La asignación de parámetros permitió definir con precisión las capas constructivas, los sistemas de control solar y las aberturas de ventilación pasiva evaluadas.

Los parámetros considerados incluyeron: conductividad térmica, densidad, capacidad calorífica específica y propiedad óptica (reflectancia solar, transmitancia solar o absorptancia solar, según correspondió al mecanismo físico de cada estrategia). Todos los valores fueron seleccionados a partir de normativas técnicas (ASHRAE, ISO 52016-1), bases de datos de referencia y especificaciones de fabricantes.

Tabla 38. Propiedades térmicas, ópticas y constructivas de materiales empleados en los escenarios EIM_01 a EIM_30.

Material/Elemento (escenarios)	Conductividad térmica (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad calorífica específica (J/kg·K)	Parámetro óptico
Pintura reflectante blanca (EIM_01)	0.10	1200	1400	Reflectancia solar = 0.85
Revestimiento termocrómico (EIM_02)	0.20	1200	1400	Reflectancia solar variable: 0.30 (baja T) / 0.80 (alta T)
Vidrio claro simple (EIM_03–05) – 6 mm	1.00	2500	750	Transmitancia solar = 0.88
Vidrio control solar (EIM_06) – 6 mm + sombra	1.00	2500	750	Transmitancia solar = 0.20
Panel metálico sombreado (EIM_07, EIM_08)	50.00	7850	500	Reflectancia solar = 0.60

Material/Elemento (escenarios)	Conductividad térmica (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad calorífica específica (J/kg·K)	Parámetro óptico
Pantalla vertical / Alero metálico (EIM_09, EIM_10)	50.00	7850	500	Reflectancia solar = 0.50
Poliuretano proyectado (EIM_11, EIM_12)	0.024	35	650	—
Fibra de vidrio (EIM_13)	0.040	16	800	—
Celulosa (EIM_14, EIM_18, EIM_19)	0.038	45	2100	—
Poliestireno expandido (EIM_15, EIM_16, EIM_17)	0.035	25	1300	—
Aberturas operables (EIM_20–EIM_26)	—	—	—	—
Chimenea solar (EIM_27)	45.00	7800	500	Absortancia solar = 0.95
Extractores eólicos (EIM_28)	—	—	—	—
Rejillas de ventilación (EIM_29)	—	—	—	—
Tragaluces ventilados (EIM_30)	1.00	1200	1470	Transmitancia solar = 0.85

Nota: Los dispositivos sin masa térmica (aberturas, rejillas, extractores) no requieren parametrización termofísica en el balance energético dinámico de DesignBuilder®. Elaboración propia (2025).

En conjunto, la tabla anterior sistematiza los parámetros físicos y ópticos empleados para la caracterización de los materiales y sistemas pasivos modelados. Los materiales de protección solar se definieron por alta reflectancia; los aislantes, por conductividades térmicas bajas y densidades reducidas; y los dispositivos de ventilación, por proporciones de área abierta en las superficies de control.

Cada conjunto de datos se sustentó en fuentes normativas, bases de datos técnicas o literatura especializada. Esto permitió establecer condiciones controladas

en el modelado energético, donde las variaciones de desempeño térmico resultan estrictamente atribuibles a las estrategias pasivas aplicadas.

3.6.3 Escenarios combinados integrados.

La definición de escenarios integrados que combinan estrategias pasivas pertenecientes a los distintos bloques evaluados (protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor). La integración de escenarios tuvo como objetivo explorar el comportamiento conjunto de intervenciones pasivas técnicamente compatibles, se consideró la posibilidad de sinergia entre mecanismos físicos distintos.

El proceso de selección de combinaciones consideró los siguientes criterios metodológicos:

- I. Compatibilidad funcional entre estrategias aplicadas sobre diferentes componentes de la envolvente, sin interferencias operativas o constructivas.
- II. Complementariedad térmica, sin superposición de estrategias con efectos redundantes sobre el mismo flujo térmico.
- III. Viabilidad técnica, constructiva y operativa dentro de las características del edificio de estudio.
- IV. Sustento en los resultados obtenidos previamente de los escenarios individuales.

Las combinaciones definidas en esta etapa metodológica fueron posteriormente evaluadas durante el análisis de resultados, a partir de su desempeño térmico global, pero siempre dentro del marco de las configuraciones documentadas en los escenarios EIM_01 a EIM_30.

3.6.4 Tabla maestra de escenarios: codificación, intervención, simulación.

La tabla 39, sintetiza la codificación de los escenarios simulados (EIM_01 a EIM_30), identificando para cada caso el tipo de estrategia aplicada, el elemento constructivo intervenido y una descripción técnica resumida de la intervención modelada.

Tabla 39. Codificación y descripción de escenarios simulados (EIM_01 a EIM_30).

Código EIM	Tipo de estrategia	Elemento intervenido	Descripción de la intervención
EIM_01	Protección solar y térmica	Cubierta	Revestimiento reflectante blanco
EIM_02	Protección solar y térmica	Cubierta	Revestimiento termocrómico
EIM_03	Protección solar y térmica	Frente vertical de cubierta (este)	Acristalamiento 10% sin control solar
EIM_04	Protección solar y térmica	Frente vertical de cubierta (este)	Acristalamiento 20% sin control solar
EIM_05	Protección solar y térmica	Frente vertical de cubierta (este)	Acristalamiento 30% sin control solar
EIM_06	Protección solar y térmica	Frente vertical de cubierta (este)	Acristalamiento 20% con control solar
EIM_07	Protección solar y térmica	Cubierta	Sombreado horizontal 50%
EIM_08	Protección solar y térmica	Cubierta	Sombreado horizontal 75%
EIM_09	Protección solar y térmica	Frente vertical de cubierta (este)	Sombreado vertical exterior
EIM_10	Protección solar y térmica	Fachada sur	Alero fijo horizontal
EIM_11	Amortiguamiento térmico	Cubierta	Poliuretano proyectado 5 cm
EIM_12	Amortiguamiento	Cubierta	Poliuretano proyectado 10 cm

Código EIM	Tipo de estrategia	Elemento intervenido	Descripción de la intervención
	térmico		
EIM_13	Amortiguamiento térmico	Cubierta	Fibra de vidrio 12.7 cm
EIM_14	Amortiguamiento térmico	Cubierta	Celulosa proyectada 10 cm
EIM_15	Amortiguamiento térmico	Cubierta	Poliestireno expandido 3.8 cm
EIM_16	Amortiguamiento térmico	Muros perimetrales (exterior)	EPS 2.5 cm (sistema EIFS)
EIM_17	Amortiguamiento térmico	Muros perimetrales (exterior)	EPS 7.5 cm (sistema EIFS)
EIM_18	Amortiguamiento térmico	Muros perimetrales (interior)	Celulosa inyectada 5 cm
EIM_19	Amortiguamiento térmico	Muros perimetrales (interior)	Celulosa inyectada 10 cm
EIM_20	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 10% (ventilación diurna)
EIM_21	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 20% (ventilación diurna)
EIM_22	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 40% (ventilación diurna)
EIM_23	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 60% (ventilación diurna)
EIM_24	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 40% (ventilación nocturna)
EIM_25	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta (este)	Apertura operable 60% (ventilación nocturna)
EIM_26	Disipación de calor	Frente vertical de cubierta	Apertura operable 40% (ventilación continua 24 h)

Código EIM	Tipo de estrategia	Elemento intervenido	Descripción de la intervención
		(este)	
EIM_27	Disipación de calor	Cubierta	Chimenea solar pasiva
EIM_28	Disipación de calor	Cubierta	Extractores eólicos
EIM_29	Disipación de calor	Fachadas superiores	Rejillas de ventilación fija
EIM_30	Disipación de calor	Cubierta	Tragaluces ventilados

Nota: Elaboración propia (2025).

3.6.5 Estrategias descartadas y justificación técnica.

Durante la definición de escenarios simulados se consideraron, de forma preliminar, diversas estrategias adicionales de intervención pasiva que finalmente no fueron incorporadas al análisis. Las siguientes técnicas fueron descartadas por limitaciones de aplicabilidad, restricciones metodológicas o por no alinearse con los objetivos de esta investigación:

- Materiales de cambio de fase (PCM): A pesar de su potencial para mejorar el amortiguamiento térmico, su incorporación requiere parámetros específicos de modelado termoacumulativo, curva de cambio de estado y compatibilidad de ciclos térmicos diarios, los cuales exceden el alcance de la presente simulación y la caracterización instrumental disponible.
- Intervenciones basadas en vegetación: Estrategias como cubiertas verdes, fachadas vegetales o sistemas de sombreado por arbolado no fueron incluidas, debido a la dificultad de establecer parámetros precisos de evapotranspiración, desarrollo biológico, mantenimiento y estabilidad estacional en el contexto climático cálido seco extremo de Mexicali.

La exclusión de estas estrategias permite mantener la coherencia metodológica de escenarios estrictamente arquitectónicos y constructivos, enfocados en materiales, dispositivos pasivos y condiciones controladas de operación

3.7 Validación y ajuste del modelo

3.7.1 Justificación del Método Seleccionado

En el presente estudio, la validación del modelo térmico se fundamenta en la cuantificación del ajuste entre valores simulados mediante DesignBuilder® y temperaturas interiores monitoreadas en campo, específicamente durante condiciones críticas representativas del clima extremo cálido seco de la región. Para ello, se seleccionó el índice PMARE (Percent Mean Absolute Relative Error), definido en la literatura técnica como un índice validado y utilizado en la evaluación de precisión relativa en modelos de simulación energética de edificios (Ali, 2021; Raftery et al., 2011; Coakley et al., 2014).

La elección del PMARE se justifica debido a su capacidad para expresar claramente el error en términos porcentuales relativos, los que facilita su interpretación en contextos técnicos y académicos. Su aplicación resulta especialmente indicada para evaluar simulaciones térmicas de envolventes ligeras, donde las fluctuaciones térmicas son pronunciadas, ya que elimina la compensación de errores positivos y negativos que otras métricas como el NMBE o RMSE pueden presentar. Esto garantiza una evaluación integral y estable del ajuste durante todo el periodo de análisis.

3.7.2 Definición Matemática del Índice PMARE

El PMARE se define matemáticamente mediante la siguiente expresión (Ecuación 1):

Ecuación 1. Expresión matemática de PMARE

$$PMARE (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Abs(O_i - P_i)}{O_i}$$

Donde:

- O_i : Valor observado o monitoreado en el campo ($^{\circ}\text{C}$).
- P_i : Valor simulado por el modelo ($^{\circ}\text{C}$).
- Abs : Valor absoluto
- n : Número total de observaciones emparejadas.

3.7.3 Aplicación Técnica del Método de Validación

Para el cálculo preciso del índice PMARE se tomaron registros horarios emparejados del día crítico seleccionado (16 de mayo), correspondientes a las condiciones de máxima carga térmica durante el monitoreo. El total de registros emparejados utilizados fue de 23 observaciones. La tabla completa de resultados se presenta a continuación:

Tabla 40.

Resultados individuales de validación estadística PMARE

N°	O ($^{\circ}\text{C}$)	P ($^{\circ}\text{C}$)	$(O-P)^2$	$(O-\bar{O})$	$(P-\bar{P})$	$(O-\bar{O})^2$	%
1	23.58	28.71	26.3979	6.8278	1.6899	72.5509	17.89%
2	23.03	27.87	23.4412	7.7378	2.5362	98.2861	17.37%
3	22.25	27.09	23.3981	8.1528	3.3156	131.5233	17.91%
4	22.03	26.44	19.5316	8.3778	3.9583	152.1796	16.71%
5	21.95	25.94	15.8880	8.4528	4.4668	166.9158	15.37%
6	22.13	25.81	13.6033	8.2778	4.5895	165.5674	14.29%
7	24.05	26.22	4.6953	6.3528	4.1859	111.0644	8.27%
8	28.13	26.89	1.5220	2.2778	3.5145	33.5158	4.59%
9	31.65	28.26	11.4596	1.2472	2.1379	11.4596	11.98%
10	34.70	29.78	24.1771	4.2972	0.6198	24.1771	16.51%
11	37.35	31.26	37.0489	6.9472	0.8604	60.9594	19.47%

N°	O (°C)	P (°C)	(O-P)²	(O- \bar{O})	(P- \bar{P})	(O- \bar{O})²	%
12	39.23	32.52	44.9026	8.8222	2.1217	119.7596	20.60%
13	40.98	33.36	57.9604	10.7572	2.9594	183.0945	22.82%
14	41.28	34.28	48.9096	10.8722	3.8786	217.5887	20.40%
15	41.08	34.99	37.0334	10.6722	4.5867	232.8347	17.39%
16	39.98	35.15	23.2601	9.5722	4.7493	205.1071	13.72%
17	38.10	34.80	10.8672	7.6972	4.4006	146.3584	9.47%
18	35.53	34.06	2.1598	5.1222	3.6525	76.9907	4.32%
19	32.55	33.15	0.3595	2.1472	2.7468	23.9514	1.81%
20	30.43	32.07	2.7036	0.0221	1.6665	2.8513	5.13%
21	29.05	31.13	4.3195	1.3528	0.7255	4.3195	6.68%
22	27.85	30.19	5.4527	2.5528	0.2177	7.6755	7.74%
23	26.48	29.28	7.8932	3.9278	1.1183	25.4629	9.59%

Nota: O: Temperatura observada (°C); P: Temperatura simulada (°C); (O-P)²: Error cuadrático individual; (O- \bar{O}): Desviación absoluta de la observación respecto al promedio observado; (P- \bar{P}): Desviación absoluta de la simulación respecto al promedio simulado; (O- \bar{O})²: Error cuadrático de la observación respecto a su promedio; %: Porcentaje de error relativo individual; N: Número total de observaciones (N = 23). Elaboración propia (2025).

Al aplicar la ecuación (Ecuación 1) a los datos térmicos monitoreados durante el mes de mayo, el valor promedio de PMARE obtenido fue:

$$PMARE (\%) = 13.04\%$$

Este valor representa el error absoluto medio relativo entre las temperaturas simuladas y las temperaturas reales monitoreadas.

3.7.4 Interpretación de Resultados y Validación

La interpretación del índice PMARE, siguiendo la propuesta de Ali (2021), se establece bajo los siguientes rangos (Tabla 40):

Tabla 41. Criterios de interpretación del índice PMARE.

Intervalo PMARE (%)	Evaluación
0 – 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Aceptable
20 – 25	Moderado
> 25	Insatisfactorio

Nota: Elaboración propia (2025).

El resultado obtenido se ubica dentro del rango “Bueno” conforme a los criterios de validación establecidos. Este nivel de ajuste corresponde a los márgenes de aceptabilidad documentados en la literatura especializada para modelos de simulación térmica aplicados a edificios bajo distintas características de envolvente y configuración tipológica (Raftery et al., 2011; Coakley et al., 2014). La concordancia cuantitativa alcanzada entre los registros experimentales y los resultados generados permite afirmar que el modelo replica con precisión suficiente el comportamiento térmico del caso de estudio. Bajo este criterio metodológico validado, el modelo queda establecido como herramienta técnica adecuada para el análisis comparativo de las estrategias pasivas presentadas en los capítulos siguientes.

3.8 Análisis de resultados y técnicas estadísticas

3.8.1 Variables extraídas y criterios comparativos

El procesamiento de resultados se estructuró a partir de la temperatura operativa interior (Top), definida como la variable térmica de referencia para todos los escenarios simulados. Este parámetro, calculado por el motor de simulación, integra

de forma combinada las temperaturas del aire interior, las temperaturas radiantes medias de superficies internas y la carga térmica global de la envolvente, lo que permite representar con mayor precisión el efecto acumulado de las estrategias pasivas aplicadas sobre edificaciones industriales sin climatización activa.

La selección de la temperatura operativa respondió a su sensibilidad para reflejar modificaciones térmicas derivadas de:

- Cambios en las propiedades ópticas superficiales (reflectancia y emisividad).
- Variaciones en la capacidad de amortiguamiento térmico de la envolvente.
- Flujos de radiación térmica de superficies interiores.
- Eficiencia de los mecanismos pasivos de disipación mediante ventilación controlada.

Este criterio de selección se alinea con metodologías validadas en investigaciones orientadas al análisis de desempeño pasivo en climas áridos cálido-secos (Givoni, 1994; La Roche, 2011).

Las comparaciones se efectuaron mediante:

- Los valores mensuales de temperatura operativa (Top) registrados en cada escenario simulado.
- La diferencia térmica mensual relativa (ΔT), calculada como $\Delta T = \text{Top_escenario} - \text{Top_base}$, la cual expresa el efecto térmico diferencial de cada estrategia respecto al modelo base.

El análisis se centró entre mayo y septiembre, establecido como periodo crítico por concentrar las condiciones térmicas de mayor severidad. Durante estos meses, las temperaturas máximas diarias superan sistemáticamente los 35 °C, con registros extremos de hasta 47.1 °C en julio. Las medias mensuales dentro de este intervalo se sitúan entre 28.5 °C y 35.1 °C, conforme a los registros EPW utilizados (ver apartado 3.2.2).

Para cada estrategia se elaboraron gráficos individuales que muestran la evolución mensual de la temperatura operativa en comparación directa con el escenario base, acompañados de tablas numéricas que documentan las diferencias térmicas mensuales.

Adicionalmente, se presentaron gráficos globales por grupo de estrategias (revestimientos reflectantes, acristalamientos, aislamiento térmico y ventilación pasiva), con registro tanto del comportamiento anual como del acumulado correspondiente al periodo crítico mayo-septiembre.

3.8.2 Métodos de procesamiento y herramientas gráficas.

El procesamiento de los datos simulados se realizó mediante la exportación directa de los resultados numéricos generados por DesignBuilder®. Cada conjunto fue revisado para descartar registros incompletos, valores atípicos o inconsistencias numéricas que pudieran comprometer la validez del análisis.

Posteriormente, los datos validados se organizaron en hojas de cálculo, donde se calcularon las diferencias térmicas mensuales (ΔT) correspondientes a cada escenario respecto al modelo base. Este procedimiento generó las bases numéricas para la construcción de los gráficos de comparación.

Las representaciones gráficas se desarrollaron bajo un esquema uniforme, se utilizaron diagramas de barras agrupadas ajustadas a los criterios de variación térmica mensual definidos para el estudio. Este formato mantuvo la homogeneidad visual requerida para el tratamiento comparativo de los escenarios en las etapas subsecuentes de análisis.

Estos registros numéricos y sus representaciones gráficas constituyen la estructura documental de soporte para el análisis comparativo integrado que se presenta en el Capítulo 4.

3.9 Alcances, limitaciones y replicabilidad

3.9.1 Limitaciones técnicas y de acceso.

El desarrollo del modelo se realizó sobre un edificio industrial representativo a escala intermedia, seleccionado con base en criterios de accesibilidad, disponibilidad y control operativo. Si bien las características constructivas permiten suponer cierta representatividad regional, los resultados no se extrapolan directamente a otras tipologías industriales de mayor escala o sistemas constructivos distintos.

La instrumentación térmica interior se aplicó en zonas funcionales accesibles, limitándose en aquellas áreas con restricciones físicas o de operación. Los registros obtenidos corresponden a las variables térmicas principales definidas para la validación y ajuste del modelo, sin incorporar otras variables ambientales o de carga interna no contempladas.

El proceso de simulación energética consideró escenarios bajo condiciones de operación estables y programadas, sin incorporar variaciones dinámicas de ocupación o cargas intermitentes. Las estrategias pasivas de disipación de calor mediante ventilación se configuraron bajo controles térmicos simplificados, consistentes con las capacidades operativas de DesignBuilder® para este tipo de modelados.

Estas limitaciones operativas fueron consideradas desde la fase de diseño metodológico, manteniéndose dentro de los márgenes aceptados para la validez comparativa de los escenarios evaluados.

3.9.2 Alcance contextual y tipológico del método.

El procedimiento desarrollado corresponde a un análisis comparativo aplicado a un caso de estudio representativo de edificaciones industriales ligeras localizadas en clima cálido seco extremoso. El modelo digital, los escenarios simulados y las estrategias evaluadas se formularon con base en las condiciones físicas, constructivas y operativas documentadas en el edificio seleccionado.

El edificio analizado presenta un volumen predominante de áreas no climatizadas, donde se concentran los espacios de uso operativo y de almacenamiento. Adicionalmente, incorpora un porcentaje reducido de superficie acondicionada, correspondiente a salas de capacitación y zona administrativa, bajo sistemas de climatización convencional. Esta distribución funcional fue considerada en el proceso de modelado térmico y validación instrumental.

Los resultados obtenidos permiten identificar comportamientos térmicos vinculados a las distintas estrategias pasivas analizadas; sin embargo, su aplicabilidad directa queda acotada a edificaciones industriales de envolvente ligera, características constructivas equivalentes y distribución funcional semejante. Las conclusiones no extienden su alcance a edificaciones con predominancia de sistemas activos de climatización ni a tipologías masivas o automatizadas.

El método implementado conserva su validez replicable para estudios de rehabilitación energética pasiva en edificios industriales de configuración comparable, ubicados en climas cálido-secos de características térmicas equivalentes, bajo las condiciones de modelado y validación definidas en el presente trabajo.

3.9.3 Condiciones para la replicabilidad del procedimiento.

El procedimiento metodológico desarrollado mantiene condiciones replicables para la evaluación de estrategias pasivas en edificaciones industriales de envolvente ligera, ubicadas en climas cálido-secos extremos. La secuencia aplicada comprende el levantamiento físico, la caracterización térmica, el monitoreo instrumental, el modelado energético validado, la configuración de escenarios pasivos y el análisis comparativo estructurado.

Para su aplicación en otros casos de estudio, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Levantamiento físico y geométrico completo de la edificación.

- Caracterización constructiva detallada de todos los elementos de envolvente y cerramientos internos.
- Registro de cargas internas reales: ocupación, iluminación, equipos y horarios de operación.
- Implementación de monitoreo térmico interior mediante sensores calibrados en puntos representativos.
- Aplicación de registros termográficos superficiales para identificación de acumulación térmica.
- Integración de datos climáticos locales, preferentemente mediante archivos EPW validados.
- Construcción del modelo digital con precisión geométrica y zonificación térmica equivalente.
- Definición de propiedades termofísicas para cada material empleado en el modelado.
- Validación y ajuste del modelo mediante comparación estadística con datos instrumentales (PMARE, RMSE).
- Configuración de escenarios de intervención pasiva según criterios compatibles de compatibilidad térmica, constructiva y operativa.
- Procesamiento de resultados bajo análisis comparativo basado en temperatura operativa (Top) y diferencias relativas (ΔT).

El cumplimiento riguroso de estos componentes asegura la consistencia metodológica necesaria para la replicación del procedimiento en edificaciones equivalentes.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la medición térmica in situ y del análisis numérico realizado mediante simulaciones energéticas. Ambos procedimientos se aplicaron al edificio industrial objeto de estudio, ubicado en un contexto climático cálido seco extremoso, con el propósito de caracterizar su comportamiento higrotérmico actual y cuantificar el efecto de estrategias pasivas de enfriamiento sobre su desempeño térmico interior.

La información se organiza en dos apartados principales. El primero documenta los registros derivados del monitoreo ambiental, diferenciando entre condiciones climáticas exteriores y microclima interior, con base en series de datos obtenidas durante un periodo crítico de demanda térmica. El segundo presenta los resultados generados por los escenarios de simulación anual, desarrollados en DesignBuilder®, a partir de un modelo previamente calibrado con datos experimentales. Las estrategias incorporadas se clasifican en tres grupos: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor.

Este conocimiento técnico contribuye a sustentar decisiones informadas para la selección de estrategias sostenibles orientadas a la rehabilitación energética de edificios en contextos similares.

4.1 Resultados individuales por categoría de estrategias pasivas

Este apartado presenta los resultados obtenidos a partir de las simulaciones anuales de estrategias pasivas aplicadas de forma individual al modelo base del edificio industrial. Las estrategias se organizan en tres categorías, conforme a los enfoques definidos en el marco conceptual: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor.

Cada escenario se evaluó bajo condiciones constantes de ocupación, operación, geometría y cargas internas, equivalentes a las del modelo base validado. En cada simulación, únicamente se modificó el componente intervenido con la estrategia pasiva correspondiente. Este criterio permite cuantificar de forma aislada el impacto térmico de cada intervención.

Los resultados se presentan mediante tablas comparativas mensuales, que incluyen los valores promedio de temperatura operativa interior en el escenario evaluado, los valores del modelo base y la diferencia térmica mensual (ΔT). Esta disposición facilita la identificación precisa de las variaciones térmicas inducidas por cada intervención a lo largo del año.

En cada figura también se señalan las temperaturas operativas máximas registradas durante los meses de mayor carga térmica, tanto en el modelo base como en el escenario evaluado. Esta marcación tiene como único propósito facilitar la identificación visual del comportamiento térmico interior, sin implicar un análisis adicional ni una interpretación de tipo comparativo fuera del marco de simulación.

4.1.1 Estrategias de protección solar y térmica

Este apartado presenta los resultados comparativos correspondientes a los escenarios que incorporan estrategias pasivas de protección solar. Las intervenciones se aplicaron sobre los elementos expuestos a radiación directa, principalmente la cubierta y los muros perimetrales. Todas las simulaciones se realizaron con condiciones de contorno constantes y emplearon el modelo base validado (Tabla 41).

Tabla 42. Escenarios de protección solar y térmica simulados. Elementos intervenidos y clasificación técnica.

ID	Clasificación	Elemento intervenido
EIM_01	Revestimiento reflectante	Cubierta
EIM_02	Revestimiento con cambio óptico	Cubierta
EIM_03	Acrilamiento 10%	Cubierta Vertical (este)
EIM_04	Acrilamiento 20%	Cubierta Vertical (este)
EIM_05	Acrilamiento 30%	Cubierta Vertical (este)
EIM_06	Acrilamiento 20% con sombra	Cubierta Vertical (este)
EIM_07	Sombreado horizontal parcial 50%	Cubierta

EIM_08	Sombreado horizontal denso 75%	Cubierta
EIM_09	Sombreado vertical	Cubierta Vertical (este)
EIM_10	Alero fijo	Muro sur

Nota: Elaboración propia (2025). Cada escenario fue simulado con condiciones térmicas equivalentes, empleando el modelo validado.

Este conjunto de escenarios conforma la base para el análisis comparativo del comportamiento térmico de la envolvente intervenida. Los resultados individuales se presentan en los subapartados siguientes.

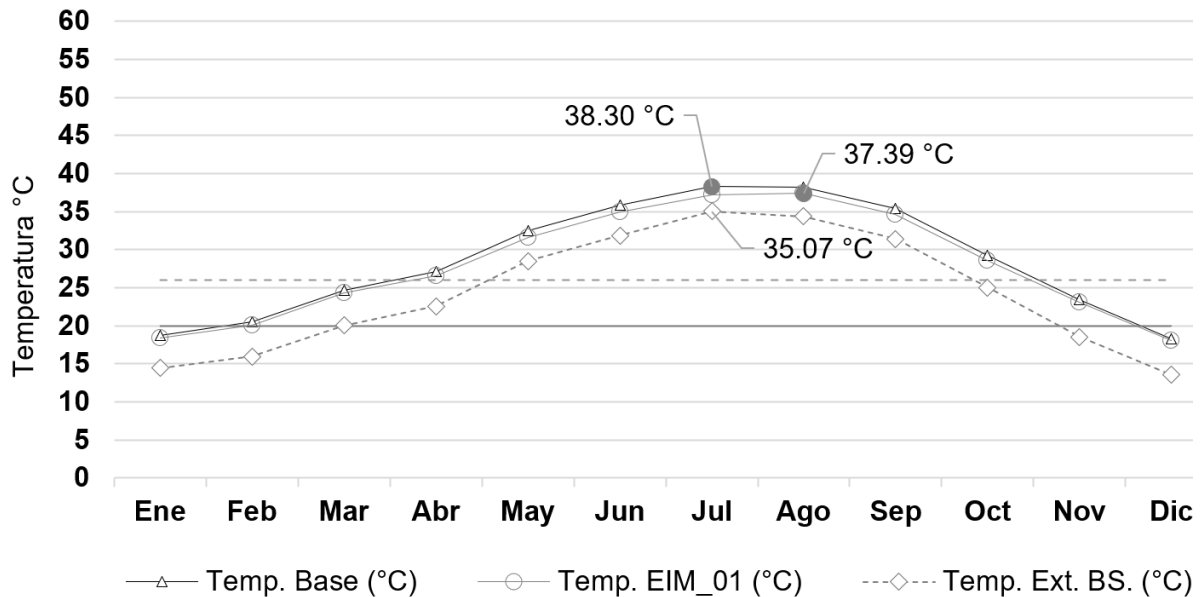
4.1.1.1 Revestimientos reflectantes en cubierta

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que aplican tratamientos superficiales de alta reflectancia sobre la cubierta del caso de estudio. La intervención se limita a la modificación de las propiedades ópticas de la superficie expuesta, manteniendo constantes las variables geométricas, funcionales y operativas definidas en el modelo base. Se documenta el comportamiento térmico individual de cada escenario respecto al escenario base, seguido del análisis comparativo global entre las variantes evaluadas.

4.1.1.1.1 Escenario EIM_01 – Revestimiento reflectante blanco

Aplicar un revestimiento blanco de alta reflectancia sobre la cubierta redujo de forma sostenida la temperatura operativa interior respecto al escenario base. El mayor diferencial mensual se registró en julio, con una temperatura operativa de 37.23 °C frente a los 38.30 °C del escenario base ($\Delta T = -1.07$ °C). Reducciones relevantes también se observaron en junio (-0.92 °C) y septiembre (-0.82 °C), meses con condiciones exteriores críticas. El promedio anual de reducción fue de -0.63 °C, mientras que, durante los cinco meses con temperaturas exteriores superiores a 35 °C, la disminución promedio ascendió a -0.84 °C. La figura 9, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 9. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_01 vs. escenario base.

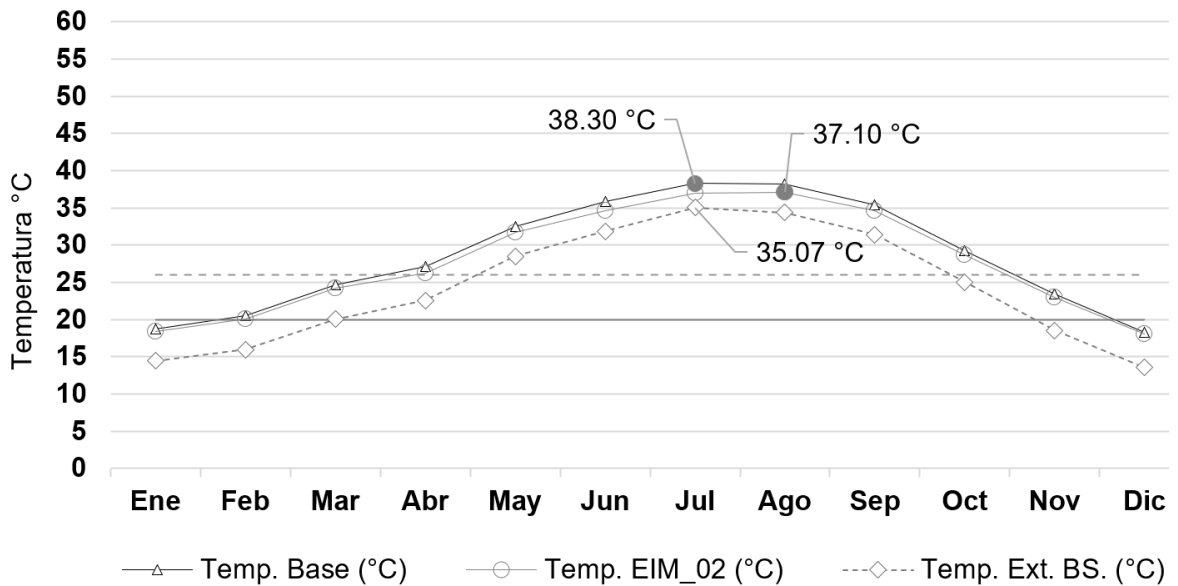


Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.1.2 Escenario EIM_02 – Revestimiento con cambio óptico

Aplicar un recubrimiento con propiedades de cambio óptico en la cubierta permitió reducir de forma continua la temperatura operativa interior respecto al escenario base. El mayor diferencial se registró en julio, con una temperatura operativa de 37.03 °C frente a 38.30 °C del escenario base ($\Delta T = -1.27$ °C). Reducciones relevantes se observaron en junio (-1.19 °C) y agosto (-1.06 °C). El promedio anual de reducción fue de -0.69 °C, mientras que, durante el periodo de mayo a septiembre, con temperaturas exteriores superiores a 35 °C, la disminución promedio alcanzó -1.01 °C. La figura 10, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 10. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_02 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.1.3 Comparación global: Revestimientos reflectantes en cubierta

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_01 y EIM_02 para establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la aplicación de los dos tratamientos reflectantes sobre la cubierta del caso de estudio. Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 42, que muestra las reducciones térmicas mensuales alcanzadas por cada escenario en relación con el modelo base.

Tabla 43. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base.

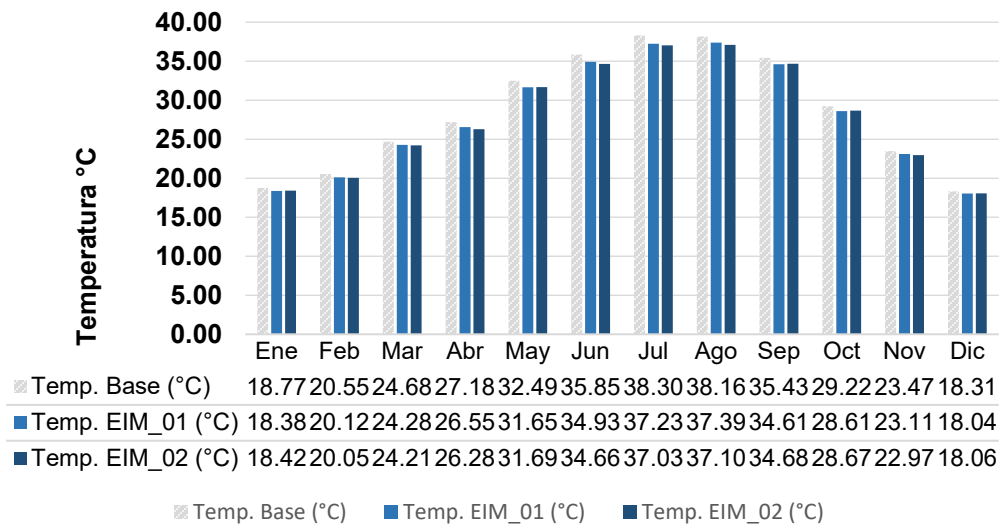
Mes	ΔT EIM_01 (°C)	ΔT EIM_02 (°C)
Mayo	0.84	0.80
Junio	0.92	1.19
Julio	1.07	1.27

Agosto	0.77	1.06
Septiembre	0.82	0.75

Nota: EIM_01: revestimiento blanco de alta reflectancia; EIM_02: revestimiento con cambio óptico; elaboración propia (2025).

La figura 11, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo ambas configuraciones. A lo largo del ciclo anual, ambos tratamientos mantienen reducciones térmicas en comparación con el escenario base, observándose reducciones moderadas durante los meses de menor carga térmica, y una diferenciación progresiva en los meses de transición hacia el periodo crítico, donde el EIM_02 alcanza mayores reducciones en los momentos de máxima radiación incidente.

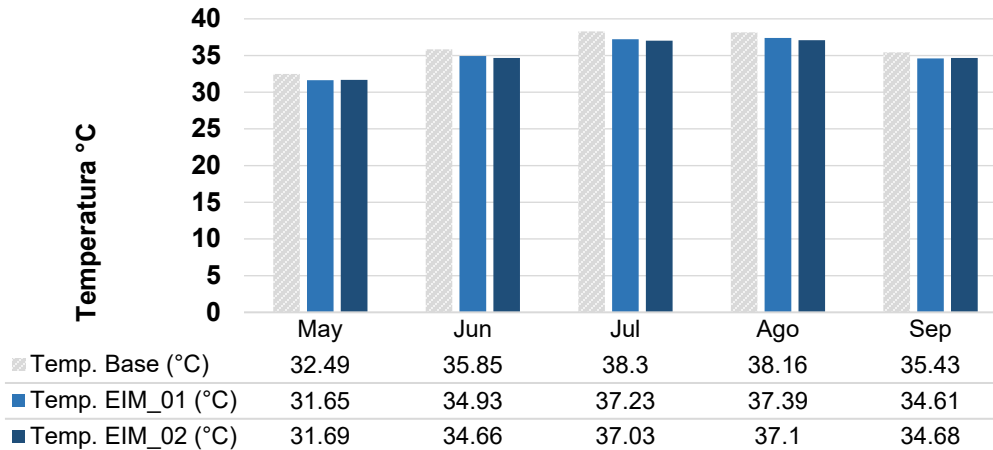
Figura 11. Evolución anual de temperatura operativa — Escenarios EIM_01 y EIM_02 vs. escenario base.



Nota: EIM_01: revestimiento blanco de alta reflectancia; EIM_02: revestimiento con cambio óptico; elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, se amplifican las diferencias observadas entre ambos tratamientos, como sintetiza la figura 12.

Figura 12. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_01–EIM_02 vs. base



Nota: Elaboración propia (2025).

El desempeño térmico del EIM_02 durante las fases de máxima carga térmica se explica por su capacidad adaptativa de modificar la reflectancia superficial conforme aumenta la temperatura de la cubierta. Esta respuesta resulta particularmente eficiente en sistemas constructivos ligeros, donde la baja capacidad de almacenamiento térmico permite que la radiación absorbida impacte de forma inmediata en el espacio interior (Givoni, 1994; Olgay, 1963). Por su parte, el EIM_01 mantiene un efecto de control térmico constante a lo largo de todo el ciclo anual, derivado de su reflectancia fija elevada, aunque con una respuesta menos acentuada frente a las variaciones térmicas extremas.

En la literatura especializada, Rawat y Singh (2021) documentaron reducciones térmicas de hasta 2.4 °C en cubiertas masivas de concreto sometidas a recubrimientos reflectantes. Las menores reducciones observadas en el presente estudio reflejan el efecto diferencial de la masa térmica entre sistemas constructivos pesados y ligeros. Mientras las cubiertas masivas amortiguan parcialmente el ingreso térmico, los sistemas metálicos ligeros exhiben una respuesta térmica inmediata y más dependiente de las propiedades ópticas superficiales. Esta condición favorece el

desempeño adaptativo de los recubrimientos con cambio óptico, como el aplicado en el EIM_02, particularmente bajo condiciones de radiación elevada (La Roche, 2011).

Las diferencias constructivas y operativas asociadas a cada tratamiento se resumen en la tabla 43.

Tabla 44. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_01 – EIM_02.

Indicador	EIM_01	EIM_02
Reflectancia solar aplicada	0.85	0.80 (cálido) / 0.30 (frío)
Emisividad térmica aplicada	0.90	0.90
Reducción térmica máxima (°C)	1.07	1.27
Mes de mayor reducción	Julio	Julio
Aspecto operativo	Bajo costo, alta estabilidad	Mayor costo, reflectancia variable
Parámetros del escenario base	Reflectancia 0.30; Emisividad 0.90	Reflectancia 0.30; Emisividad 0.90

Nota: Elaboración propia (2025).

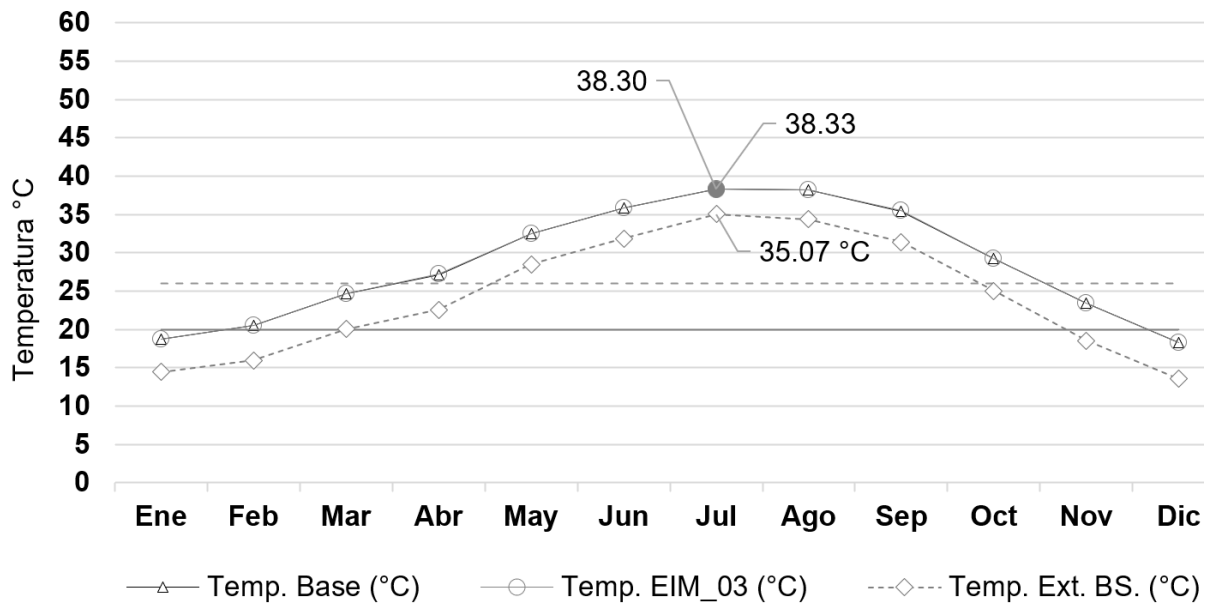
4.1.1.2 Acristalamientos con diferentes niveles de transmisión

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan superficies acristaladas con factores de transmisión solar del 10 %, 20 % y 30 %, aplicadas sobre el frente vertical de cubierta con orientación este. En el modelo base, esta superficie permanece completamente opaca. Las intervenciones modifican exclusivamente las propiedades de transmisión solar de la envolvente, mientras el resto de las condiciones geométricas, funcionales y operativas del edificio se conservan sin alteración. Se documenta el comportamiento térmico individual de cada escenario respecto al escenario base, seguido del análisis comparativo global.

4.1.1.2.1 Escenario EIM_03 – Acristalamiento 10 %

Aplicar un acristalamiento con transmitancia solar del 10 % sobre el frente vertical de cubierta no generó modificaciones térmicas significativas respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa alcanzó 38.33 °C frente a 38.30 °C del modelo base ($\Delta T = 0.03$ °C). Las diferencias mensuales se mantuvieron entre 0.02 °C y 0.04 °C a lo largo del periodo simulado. La figura 13, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 13. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_03 vs. escenario base.

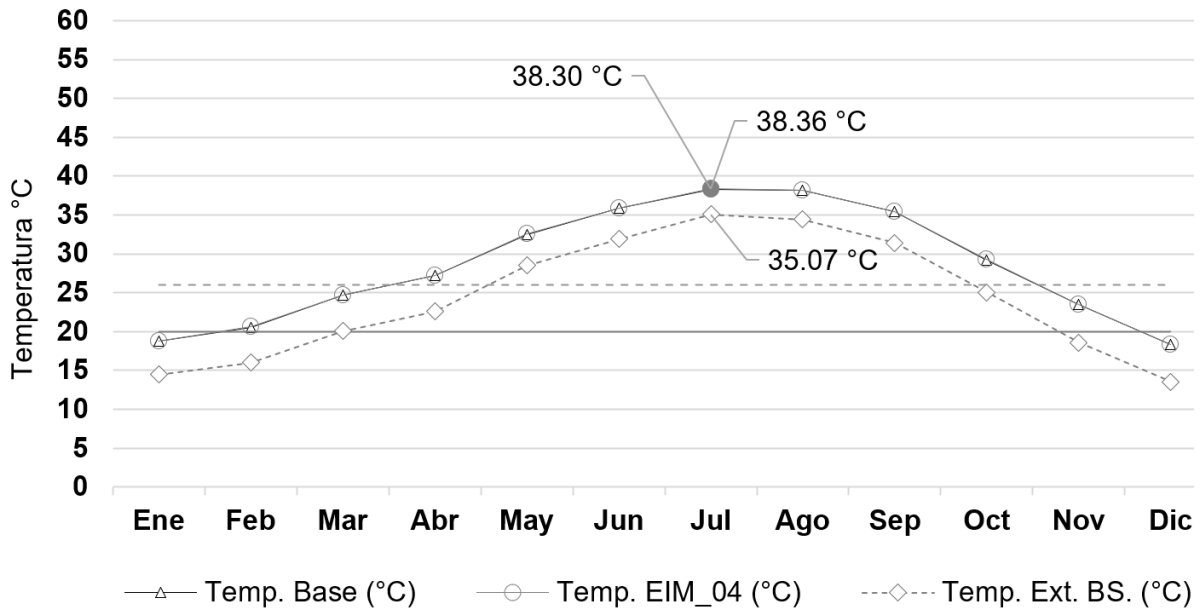


Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.2.2 Escenario EIM_04 – Acristalamiento 20 %

Incorporar un acristalamiento con transmitancia solar del 20 % sobre el frente vertical de cubierta generó un incremento térmico sostenido respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa alcanzó 38.36 °C frente a 38.30 °C ($\Delta T = 0.06$ °C). Las diferencias mensuales oscilaron entre 0.04 °C y 0.07 °C durante el periodo simulado. La figura 14, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 14. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_04 vs. escenario base.

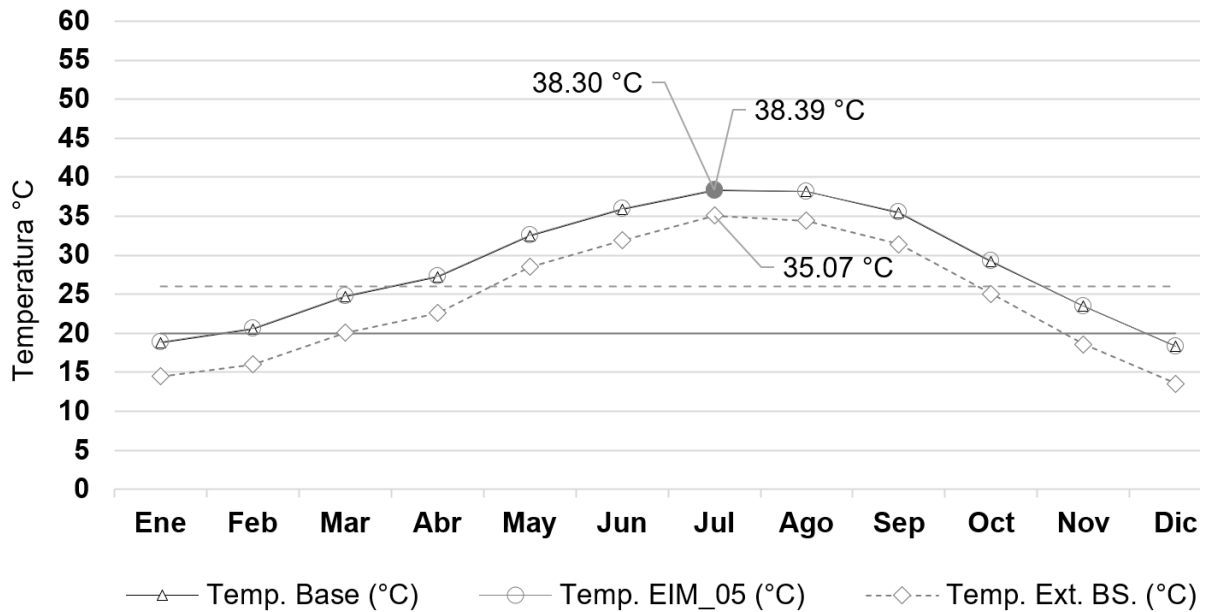


Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.2.3 Escenario EIM_05 – Acristalamiento 30 %

Incorporar un acristalamiento con transmitancia solar del 30 % sobre el frente vertical de cubierta generó un incremento térmico constante respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa alcanzó 38.39 °C frente a 38.30 °C ($\Delta T = 0.09$ °C). Las diferencias mensuales variaron entre 0.06 °C y 0.10 °C, con el mayor incremento registrado en mayo (0.10 °C). El promedio anual de incremento fue de 0.08 °C. La figura 15 presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 15. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_05 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.2.4 Comparación global: Acristalamientos con control solar

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_03, EIM_04 y EIM_05 para establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la incorporación progresiva de superficies acristaladas sobre la cubierta del caso de estudio. Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 44, que muestra los incrementos térmicos mensuales alcanzados por cada escenario en relación con el modelo base.

Tabla 45.

Incremento mensual de temperatura operativa respecto al escenario base.

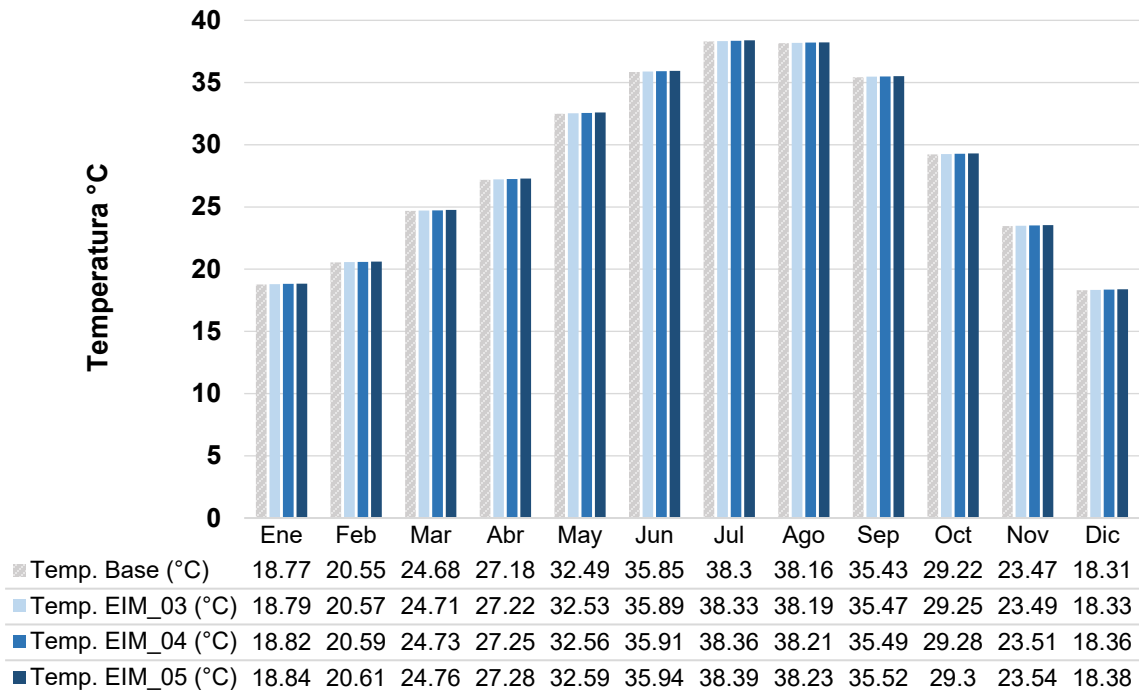
Mes	ΔT EIM_03 (°C)	ΔT EIM_04 (°C)	ΔT EIM_05 (°C)
Mayo	0.04	0.07	0.10
Junio	0.04	0.06	0.09
Julio	0.03	0.06	0.09

Agosto	0.03	0.05	0.07
Septiembre	0.04	0.06	0.09

Nota: EIM_03: acristalamiento 10 %; EIM_04: acristalamiento 20 %; EIM_05: acristalamiento 30 %; elaboración propia (2025).

La figura 16, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo las tres configuraciones. A lo largo del ciclo anual, se observan incrementos térmicos en comparación con el escenario base, con aumentos limitados durante los meses de menor carga térmica y una diferenciación progresiva conforme se aproxima el periodo crítico, donde el efecto térmico de los mayores niveles de transmitancia resulta más acentuado.

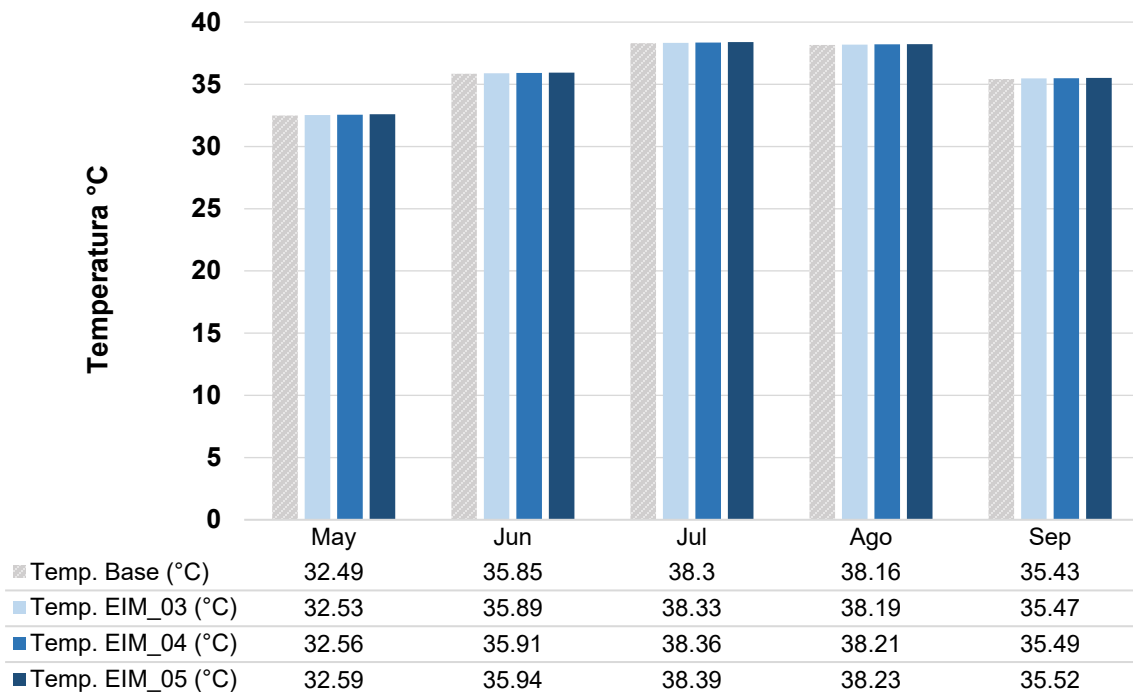
Figura 16. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_03 – EIM_05 vs. escenario base.



Nota: EIM_03: acristalamiento 10 %; EIM_04: acristalamiento 20 %; EIM_05: acristalamiento 30 %; elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, las diferencias entre los escenarios se amplifican, como sintetiza la figura 17.

Figura 17. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_03 – EIM_05 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

El comportamiento térmico registrado responde a la radiación solar transmitida hacia el interior por las superficies acristaladas incorporadas, ausentes en el escenario base. Aunque la superficie vidriada representa un porcentaje reducido de la envolvente, el nivel de transmitancia determina la magnitud de las ganancias térmicas directas, que impactan de forma inmediata el volumen interior dada la baja masa térmica del sistema constructivo modelado.

En el EIM_03 (10 % de transmitancia), los incrementos térmicos son mínimos; el EIM_04 (20 %) presenta aumentos intermedios; y el EIM_05 (30 %) alcanza los mayores incrementos, lo que refleja la acumulación progresiva de ganancia solar

interior, a medida que la transmisión solar aumenta y supera la capacidad de disipación térmica del espacio durante los meses de máxima carga.

Bajo las condiciones de clima cálido seco extremoso, los gradientes térmicos elevados y la escasa humedad reducen aún más el amortiguamiento térmico, amplificando el efecto directo de la radiación transmitida. Como establecen Olgyay (1963), Givoni (1994) y Szokolay (2014), la interacción entre área vidriada y transmitancia solar define la capacidad del sistema para amplificar la carga interna bajo este tipo de condiciones.

Las diferencias constructivas y operativas asociadas a cada tratamiento se sintetizan en la tabla 45:

Tabla 46.

Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_03 – EIM_05.

Indicador	EIM_03	EIM_04	EIM_05
Transmitancia solar aplicada	0.10	0.20	0.30
Incremento térmico máximo (°C)	0.04	0.07	0.10
Mes de mayor incremento	Mayo	Mayo	Mayo
Aspecto térmico	Incremento bajo	Incremento intermedio	Incremento superior
Parámetros del escenario base	Sin superficie acristalada	Sin superficie acristalada	Sin superficie acristalada

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.3 Sombreado horizontal en cubierta

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan sistemas de sombreado horizontal exterior aplicados sobre la zona operativa del edificio. Las intervenciones se limitaron a la modificación de la exposición solar directa sobre la cubierta, sin alterar las condiciones geométricas, funcionales ni

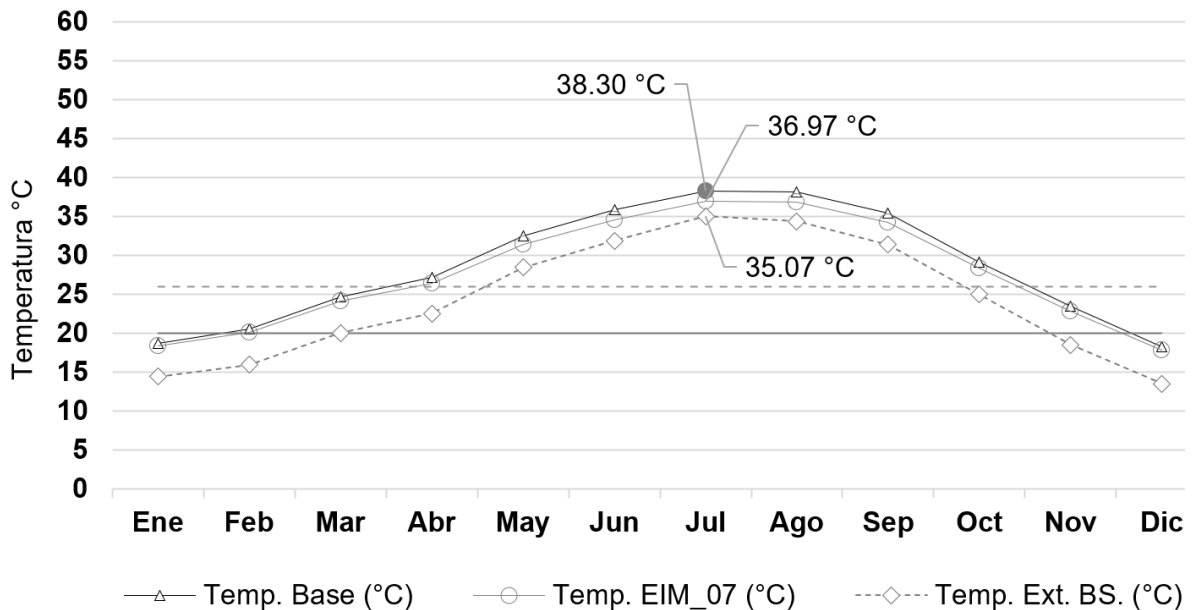
operativas del modelo base. Se documenta el comportamiento térmico individual de cada escenario respecto al escenario base, seguido del análisis comparativo global.

4.1.1.3.1 Escenario EIM_07 – Sombreado horizontal parcial (50%)

Implementar un sistema de sombreado horizontal fijo, elevado 1 m sobre la cubierta y con cobertura equivalente al 50 % del área operativa, permitió reducir de forma sostenida la temperatura operativa interior respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa alcanzó 36.97 °C frente a 38.30 °C del modelo base ($\Delta T = -1.33$ °C). Reducciones relevantes se registraron también en agosto (-1.31 °C) y junio (-1.24 °C). El promedio anual de reducción fue de -0.83 °C, mientras que, durante el periodo de mayor carga térmica (mayo a septiembre), la disminución promedio alcanzó -1.21 °C.

La figura 18, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 18. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_07 vs. escenario base.



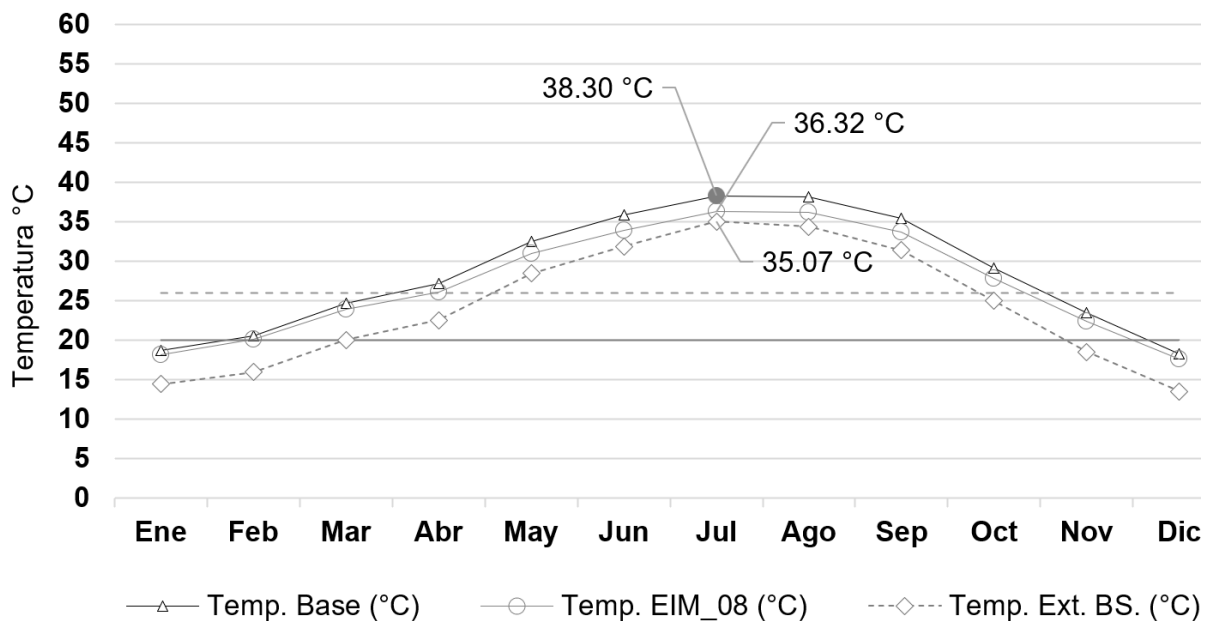
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.3.2 Escenario EIM_08 – Sombreado horizontal robusto (75%)

Incrementar la cobertura de sombreado horizontal al 75 %, manteniendo el voladizo fijo a 1 m sobre la cubierta, generó una mayor reducción térmica durante todo el año. En julio, la temperatura operativa interior descendió a 36.32 °C frente a 38.30 °C del escenario base ($\Delta T = -1.98$ °C). Descensos significativos también se observaron en agosto (-1.94 °C) y junio (-1.87 °C). El promedio anual de reducción fue de -1.18 °C, mientras que, durante el periodo de máxima carga térmica, la disminución promedio se elevó a -1.79 °C.

La figura 19, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 19. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_08 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.3.3 Comparación global entre estrategias de sombreado horizontal en cubierta

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_07 y EIM_08 para establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas del incremento en el

porcentaje de cobertura de sombreado horizontal aplicado sobre la cubierta operativa. Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 46, que muestra las reducciones térmicas mensuales alcanzadas por cada escenario en relación con el modelo base.

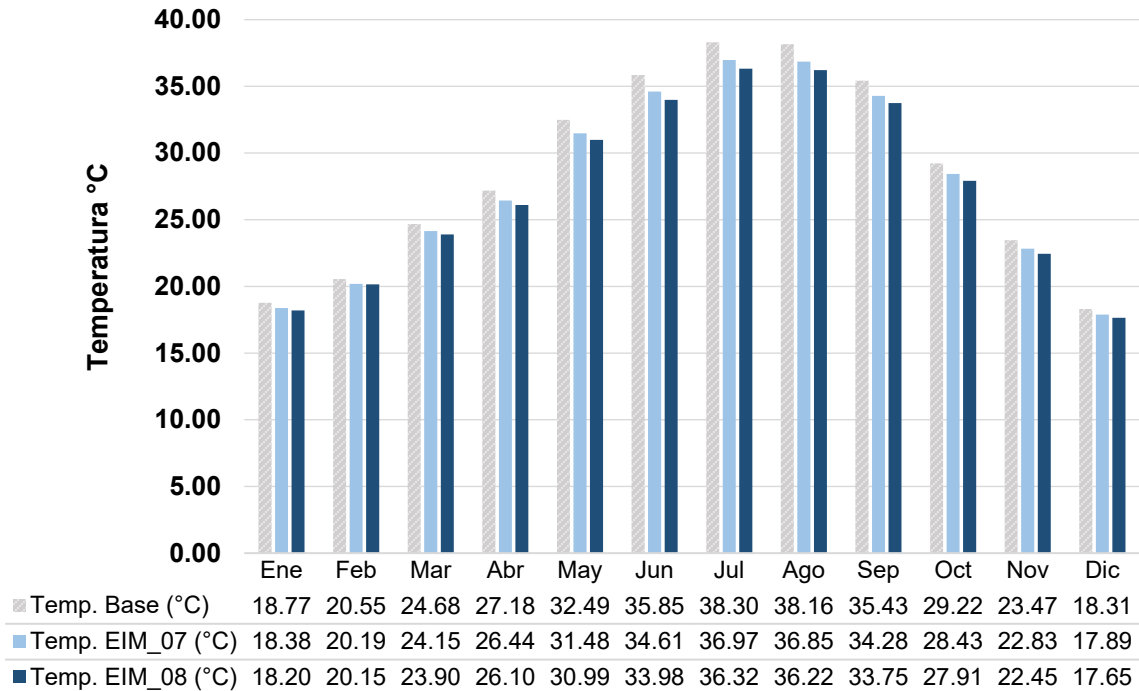
Tabla 47. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_07 – EIM_08.

Mes	ΔT EIM_07 (°C)	ΔT EIM_08 (°C)
Mayo	1.16	1.75
Junio	1.24	1.87
Julio	1.33	1.98
Agosto	1.31	1.94
Septiembre	1.02	1.42

Nota: EIM_07: sombreado horizontal 50 %; EIM_08: sombreado horizontal 75 %; elaboración propia (2025).

La figura 20, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo ambas configuraciones. A lo largo del ciclo anual, ambos tratamientos mantienen reducciones térmicas frente al escenario base, con incrementos progresivos en la magnitud de reducción conforme aumenta el porcentaje de sombreado, especialmente al aproximarse el periodo crítico.

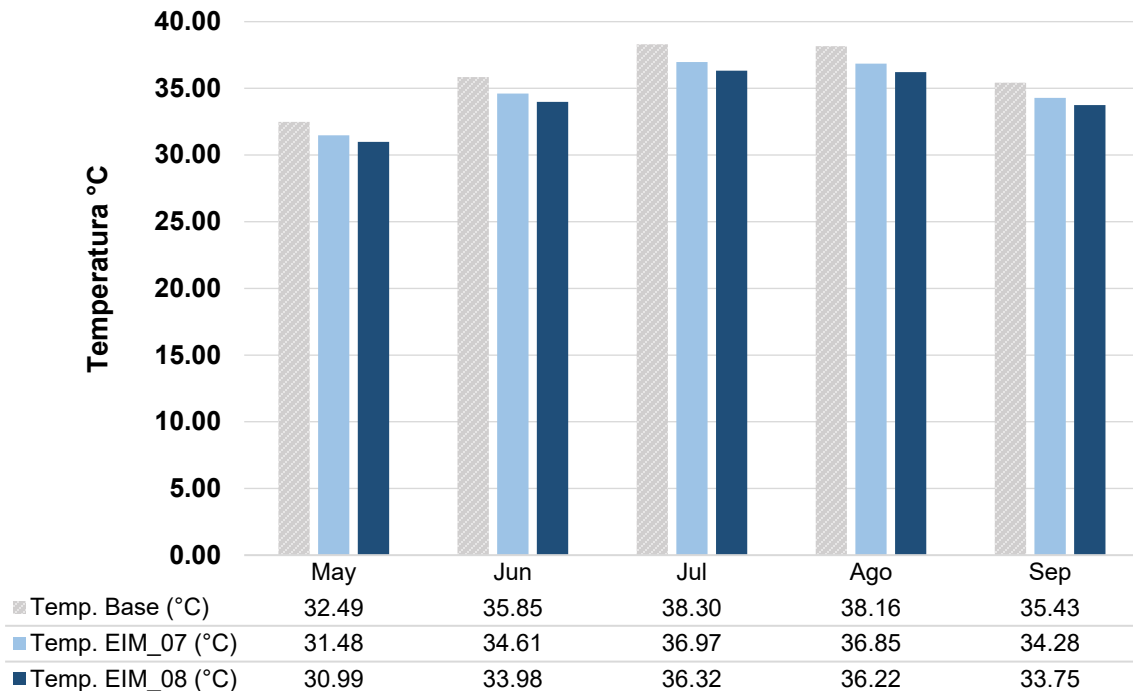
Figura 20. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.



Nota: EIM_07: sombreado horizontal 50%; EIM_08: sombreado horizontal 75%; elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, se amplifican las diferencias observadas entre ambos escenarios, como sintetiza la figura 21.

Figura 21. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

El comportamiento térmico registrado responde a la reducción directa de la radiación solar incidente sobre la cubierta operativa expuesta. El EIM_07 (50 % de cobertura) generó disminuciones térmicas relevantes, mientras que el EIM_08 (75 %) incrementó la magnitud de reducción como resultado de la menor fracción de área expuesta, limitando las ganancias térmicas acumuladas dentro del volumen interior.

Bajo las condiciones de clima cálido seco extremo, los elevados niveles de radiación directa y la escasa humedad ambiental potencian la efectividad de los sistemas de sombreado exterior al minimizar el ingreso directo de carga térmica hacia la envolvente. Alhuwayil et al. (2023), en estudios realizados bajo condiciones climáticas áridas, documentaron reducciones térmicas superiores a 2 °C mediante el empleo de dispositivos de sombreado horizontal combinados con materiales de baja emisividad. Las reducciones térmicas observadas en el presente estudio fueron ligeramente inferiores; sin embargo, el comportamiento térmico registrado mostró una tendencia cercana debido a que, al posicionarse estos elementos de sombreado sobre

la zona operativa y coincidir con el frente vertical elevado de cubierta, se incrementa su efectividad en la mitigación de la radiación solar directa sobre los planos de mayor exposición.

Como coinciden Givoni (1994), Olgay (1963), Szokolay (2014) y La Roche (2011), los sistemas de control solar pasivo constituyen una de las estrategias más efectivas para reducir las cargas internas en regiones de alta radiación, donde el componente dominante de ganancia térmica proviene de la radiación solar directa sobre las superficies expuestas.

Las diferencias constructivas y operativas asociadas a cada tratamiento se sintetizan en la tabla 47.

Tabla 48. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_07 – EIM_08.

Indicador	EIM_07	EIM_08
Cobertura aplicada (%)	50	75
Altura del sombreado (m)	1.0	1.0
Material aplicado	Fibrocemento tratado color claro	Fibrocemento tratado color claro
Reflectancia superficial (ρ)	0.65	0.65
Emisividad térmica (ϵ)	0.90	0.90
Reducción térmica máxima ($^{\circ}\text{C}$)	1.33	1.98
Mes de mayor reducción	Julio	Julio
Aspecto térmico	Reducción moderada	Reducción superior
Paramentos intervenidos	Sombreado horizontal sobre cubierta operativa	Sombreado horizontal sobre cubierta operativa

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.4 Dispositivos de sombreado vertical y lateral

Este subapartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan elementos fijos dispuestos frente a paramentos verticales con

exposición directa a la radiación solar. A diferencia de las estrategias horizontales aplicadas en cubierta, estas intervenciones se localizaron sobre superficies verticales específicas, asociadas a franjas horarias con alta incidencia solar.

El escenario EIM_09 considera un sistema de sombreado vertical colocado a 1.00 metro del frente metálico elevado de cubierta, con orientación este. El escenario EIM_10 integra un alero fijo de 1.20 metros aplicado sobre el muro sur del edificio.

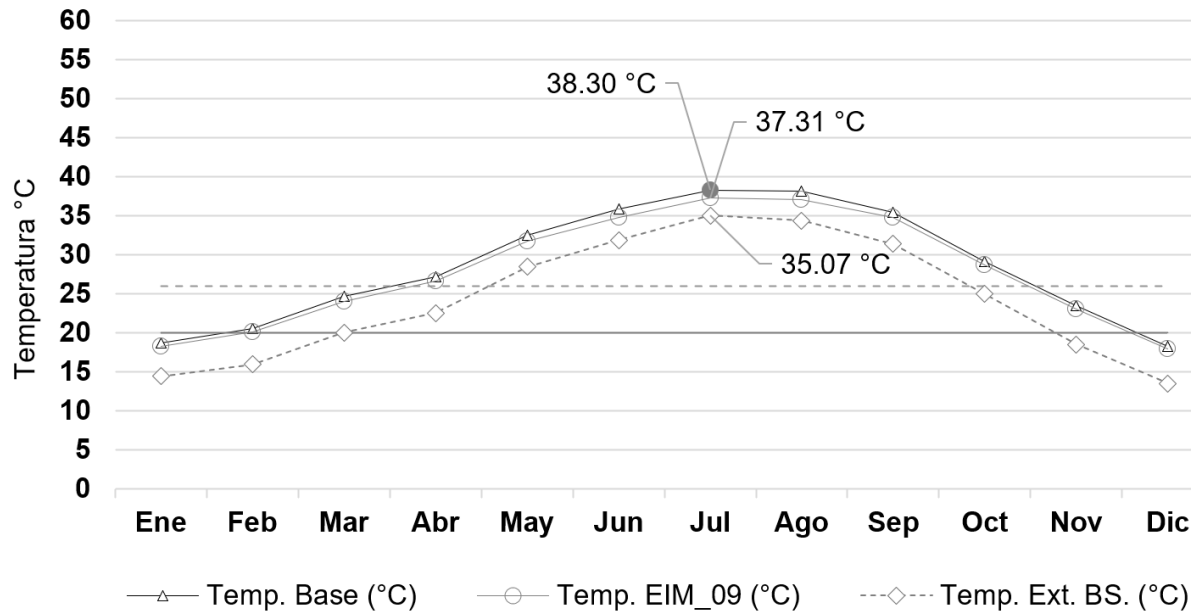
Ambas estrategias se aplicaron sobre la totalidad de los frentes verticales respectivos, sin limitarse exclusivamente al área operativa. Los resultados obtenidos permiten documentar el comportamiento térmico interior bajo estas condiciones de sombreado pasivo.

4.1.1.4.1 Escenario EIM_09 – Sombreado vertical (frente vertical de cubierta)

Aplicar un sistema de sombreado vertical fijo a 1.00 m de distancia del frente elevado de cubierta, con orientación este, permitió reducir de manera sostenida la temperatura operativa interior respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa descendió a 37.31 °C frente a los 38.30 °C del modelo base ($\Delta T = -0.99$ °C). Reducciones relevantes también se registraron en agosto (-1.02 °C) y junio (-0.99 °C). La reducción anual promedio fue de -0.62 °C, mientras que durante el periodo de mayor carga térmica (mayo a septiembre), el promedio de disminución alcanzó -0.87 °C.

La figura 22, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior bajo ambos escenarios.

Figura 22 Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_09 vs. escenario base.



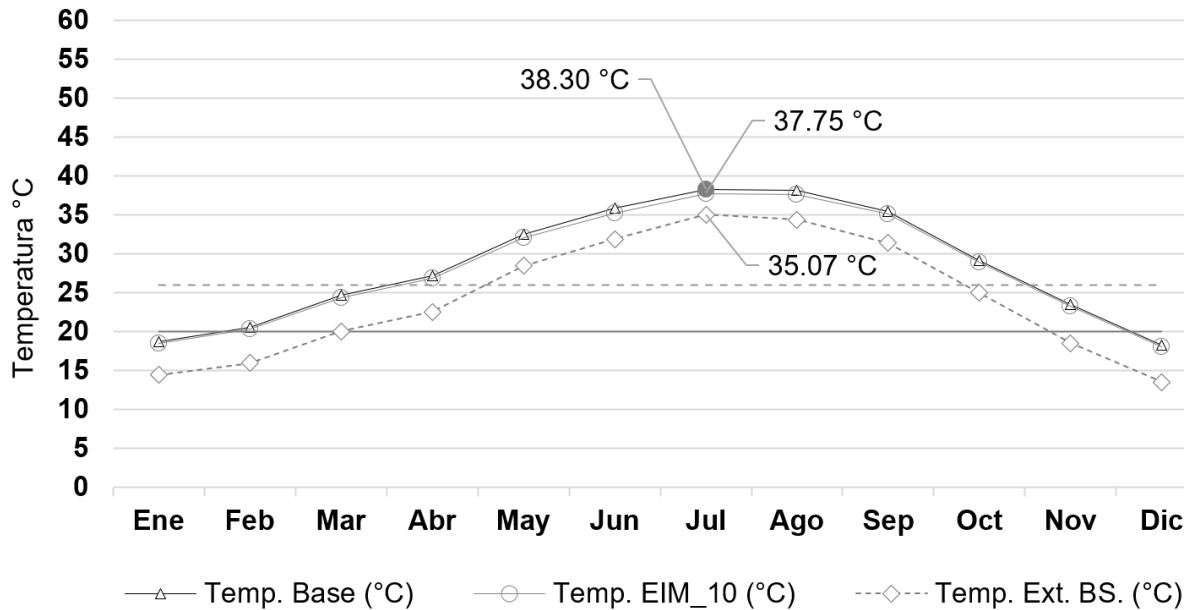
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.4.2 Escenario EIM_10 – Alero fijo (muro sur)

La implementación de un alero fijo con proyección de 1.20 m sobre el muro sur permitió generar reducciones térmicas estables a lo largo del año respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 37.75 °C frente a los 38.30 °C del modelo base ($\Delta T = -0.55$ °C). Descensos equivalentes se registraron en junio (-0.55 °C) y agosto (-0.54 °C). La reducción anual promedio fue de -0.33 °C, mientras que, durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), el promedio de disminución térmica ascendió a -0.48 °C.

La figura 23, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 23. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_10 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.1.4.3 Comparación global entre estrategias sombreado vertical y lateral

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_09 y EIM_10, con el objetivo de establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la implementación de elementos de sombreado aplicados sobre los paramentos verticales expuestos del caso de estudio. Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 48, que muestra las reducciones térmicas mensuales alcanzadas por cada escenario en relación con el modelo base.

Tabla 49. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_09 – EIM_10.

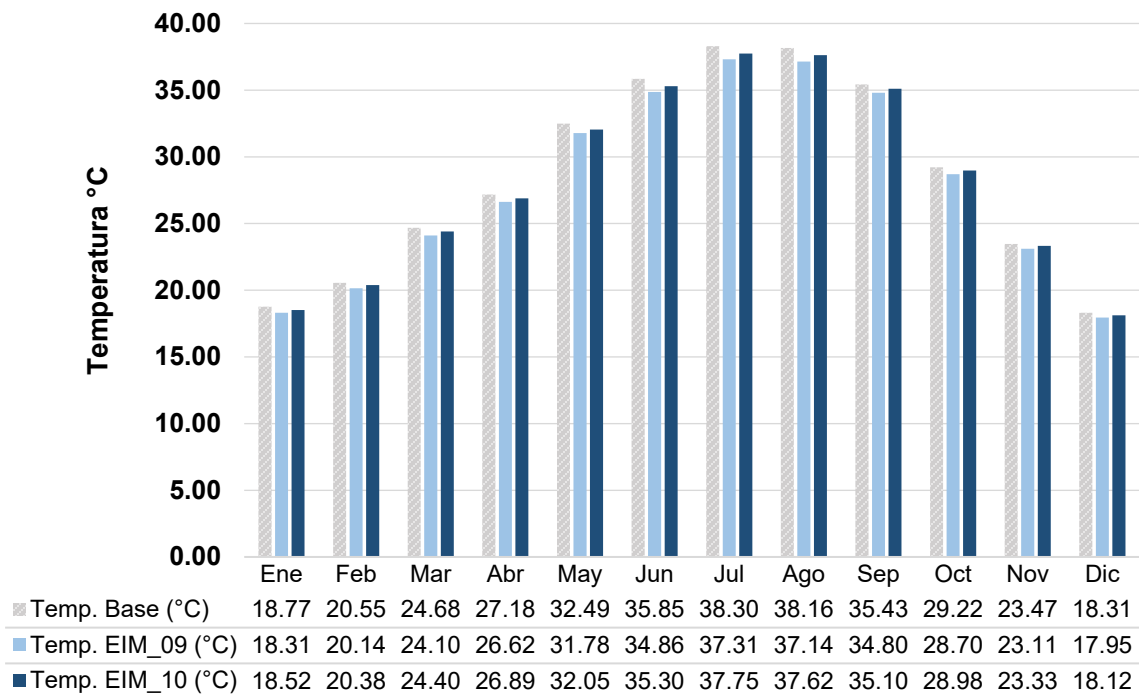
Mes	ΔT EIM_09 (°C)	ΔT EIM_10 (°C)
Mayo	0.71	0.44
Junio	0.99	0.55

Julio	0.99	0.55
Agosto	1.02	0.54
Septiembre	0.63	0.33

Nota: EIM_09: Sombreado vertical (frente vertical de cubierta); EIM_10: Alero fijo (muro sur); elaboración propia (2025).

La figura 24, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo ambas configuraciones. A lo largo del ciclo anual, ambos tratamientos registran reducciones térmicas frente al escenario base, con mayores reducciones conforme aumenta la incidencia solar sobre cada uno de los paramentos intervenidos.

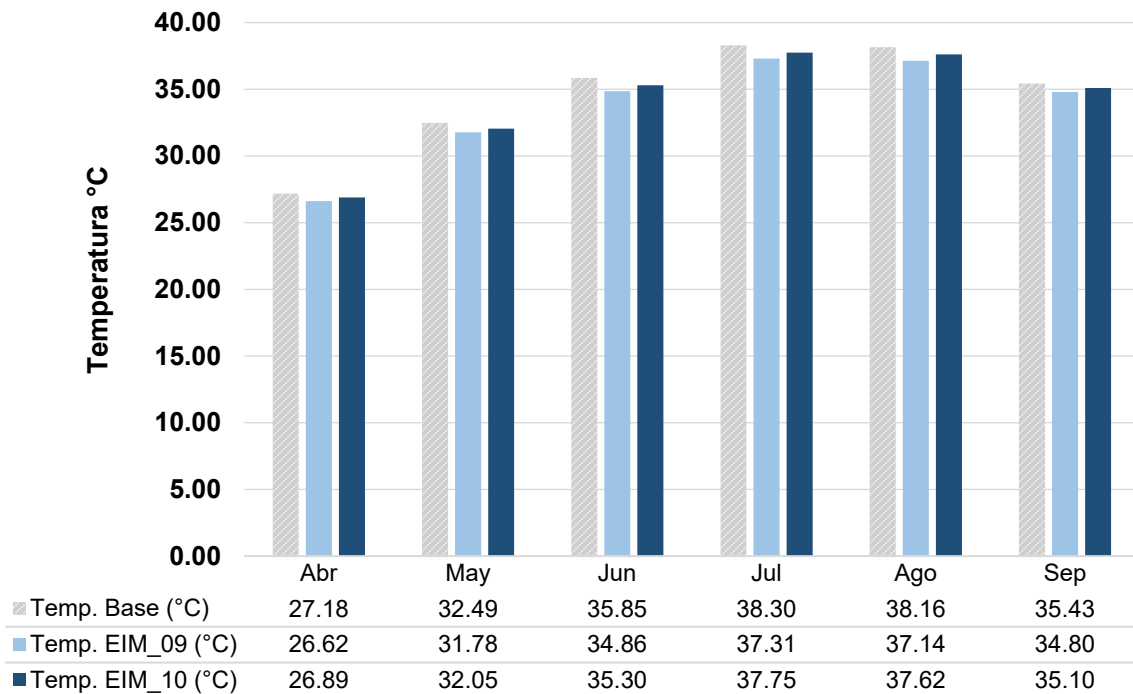
Figura 24. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_09–EIM_10 vs. escenario base.



Nota: EIM_09: Sombreado vertical (frente vertical de cubierta); EIM_10: Alero fijo (muro sur); elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, las diferencias entre los escenarios se amplifican, como sintetiza la figura 25.

Figura 25. Temperatura operativa mensual: EIM_07–EIM_08 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), los resultados evidencian un comportamiento térmico directamente condicionado por la orientación del paramento intervenido y la franja horaria de incidencia solar. El EIM_09, al ubicarse sobre el frente vertical Este, intercepta la radiación directa en las primeras horas del día, cuando el gradiente térmico interior comienza su acumulación. Este control temprano permite moderar la pendiente de carga térmica diaria, alcanzando reducciones térmicas superiores a las obtenidas en la fachada sur.

En contraste, el EIM_10, orientado al sur, actúa sobre un paramento cuya carga térmica directa es menos incidente durante los picos críticos de acumulación, limitando su contribución térmica al espacio interior. A pesar de la mayor longitud de saliente

(1.20 m), el ángulo solar dominante reduce su eficacia comparativa frente al sistema aplicado en la fachada Este.

Estos comportamientos confirman lo planteado por Givoni (1994), Szokolay (2014) y Olgyay (1963), quienes subrayan la importancia del control solar temprano sobre paramentos orientados al Este en climas cálido-secos, donde el diferencial térmico matutino tiene un peso determinante sobre el acumulado diario. La ubicación vertical del sombreado (EIM_09) permite maximizar el bloqueo en la ventana crítica de acumulación, mientras que los dispositivos aplicados a orientaciones sur, si bien funcionales, requieren mayores dimensiones o complementación para alcanzar eficiencias térmicas equivalentes.

Las diferencias constructivas y operativas asociadas a cada tratamiento se sintetizan en la tabla 50.

Tabla 50. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_09 – EIM_10.

Indicador	EIM_09	EIM_10
Tipo de dispositivo	Sombreado vertical	Alero fijo superior
Orientación intervenida	Este (frente vertical de cubierta)	Sur (muro vertical)
Distancia / Saliente aplicado	1.0 m (distancia vertical)	1.20 m (saliente horizontal)
Altura de instalación	Frente completo de cubierta	Toda la altura del muro sur
Material propuesto	Panel de fibrocemento tratado, color claro	Panel de fibrocemento tratado, color claro
Reflectancia superficial (ρ)	0.65	0.65
Emisividad térmica (ϵ)	0.90	0.90
Reducción térmica máxima ($^{\circ}\text{C}$)	0.99	0.55
Mes de mayor reducción	Agosto	Julio
Aspecto térmico	Reducción intermedia	Reducción baja
Paramentos intervenidos	Frente vertical de cubierta	Muro sur

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2 Estrategias de amortiguamiento térmico

Este subapartado presenta los resultados obtenidos a partir de los escenarios que incorporan materiales con propiedades aislantes térmicas en la envolvente del edificio. Las intervenciones se aplicaron sobre la cubierta y los muros perimetrales, con variaciones en el tipo de material y espesor.

Los materiales simulados incluyen poliuretano, fibra de vidrio, celulosa y poliestireno expandido (EPS), cada uno configurado en condiciones térmicas idénticas a las del modelo base validado. Las simulaciones se realizaron bajo un marco de comparación directa entre escenarios, manteniendo constantes los parámetros operativos, geométricos y climáticos (Tabla 50).

Tabla 51. Escenarios de amortiguamiento térmico simulados. Material, espesor y elemento intervenido ERIM_11 – EIM_19.

ID	Clasificación	Elemento intervenido
EIM_11	Poliuretano 2"	Cubierta
EIM_12	Poliuretano 4"	Cubierta
EIM_13	Fibra de vidrio 5"	Cubierta
EIM_14	Celulosa 4"	Cubierta
EIM_15	Poliestireno expandido 1.5"	Cubierta
EIM_16	Poliestireno expandido 1"	Muro
EIM_17	Poliestireno expandido 3"	Muro
EIM_18	Celulosa 2"	Muro
EIM_19	Celulosa 4"	Muro

Nota: Elaboración propia (2025).

Los escenarios listados conforman el conjunto de simulaciones correspondientes a la categoría de amortiguamiento térmico. A partir de este punto se presenta el análisis técnico de cada configuración en comparación con el modelo base.

4.1.2.1 Aislamiento en cubierta

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan sistemas de aislamiento térmico aplicados sobre la cubierta existente del edificio de estudio. Se evaluaron distintas configuraciones según material y espesor: EIM_11 (poliuretano 2”), EIM_12 (poliuretano 4”), EIM_13 (fibra de vidrio 5”), EIM_14 (celulosa 4”) y EIM_15 (poliestireno expandido 1.5”). Las intervenciones se limitaron a la modificación de las propiedades térmicas de la cubierta, manteniéndose constantes las condiciones geométricas, funcionales y operativas del modelo base. Se documenta el comportamiento térmico individual de cada escenario respecto al escenario base, seguido del análisis comparativo global.

Poliuretano

Este apartado presenta los resultados obtenidos en los escenarios que incorporan aislamiento térmico con espuma de poliuretano aplicada sobre la cubierta existente. Se evaluaron dos configuraciones: EIM_11, con un espesor de 2 pulgadas, y EIM_12, con 4 pulgadas.

Ambos escenarios fueron simulados bajo condiciones constantes del modelo base validado, sin modificaciones en la composición superficial original de la cubierta. La comparación se realiza en función de la temperatura operativa interior registrada a lo largo del año.

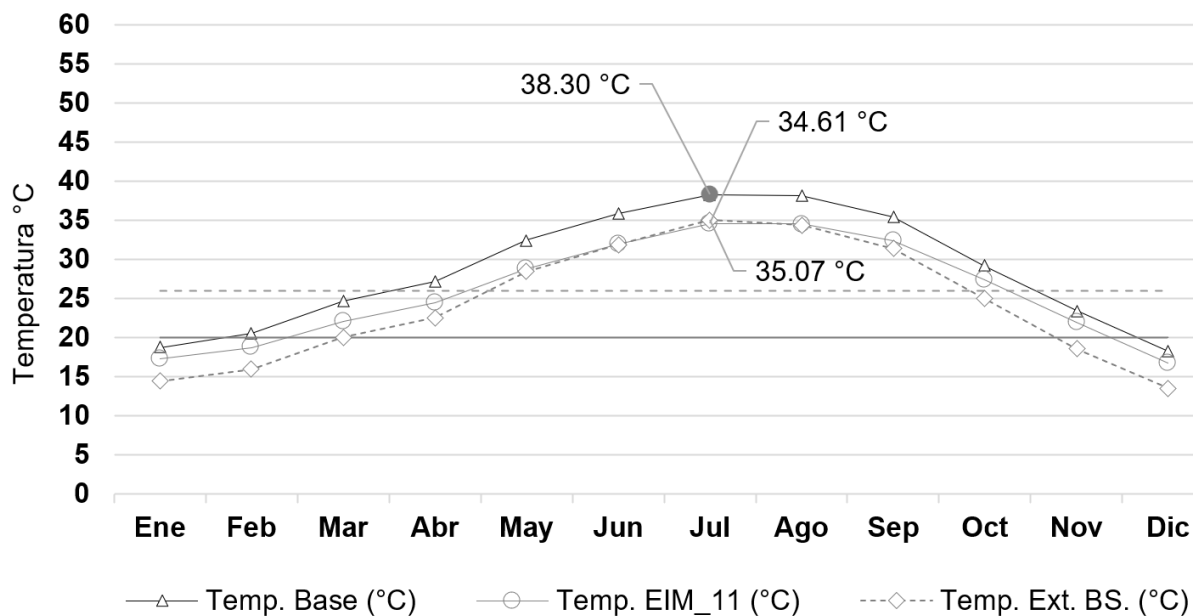
4.1.2.1.1 Escenario EIM_11 – Poliuretano 2”

Aplicar un sistema de aislamiento térmico con espuma de poliuretano de 2 pulgadas de espesor sobre la cubierta generó una reducción térmica sostenida respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior descendió a 34.61 °C, lo que representa una disminución de –3.69 °C en comparación con el escenario base (38.30 °C). Las mayores diferencias se registraron en junio (–3.84 °C), mayo (–3.61 °C) y agosto (–3.59 °C). La reducción promedio anual fue de –2.41 °C,

mientras que, durante el periodo de mayor carga térmica (mayo a septiembre), el descenso promedio alcanzó $-3.54\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 26, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior comparada entre ambos escenarios.

Figura 26. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_11 vs. escenario base.



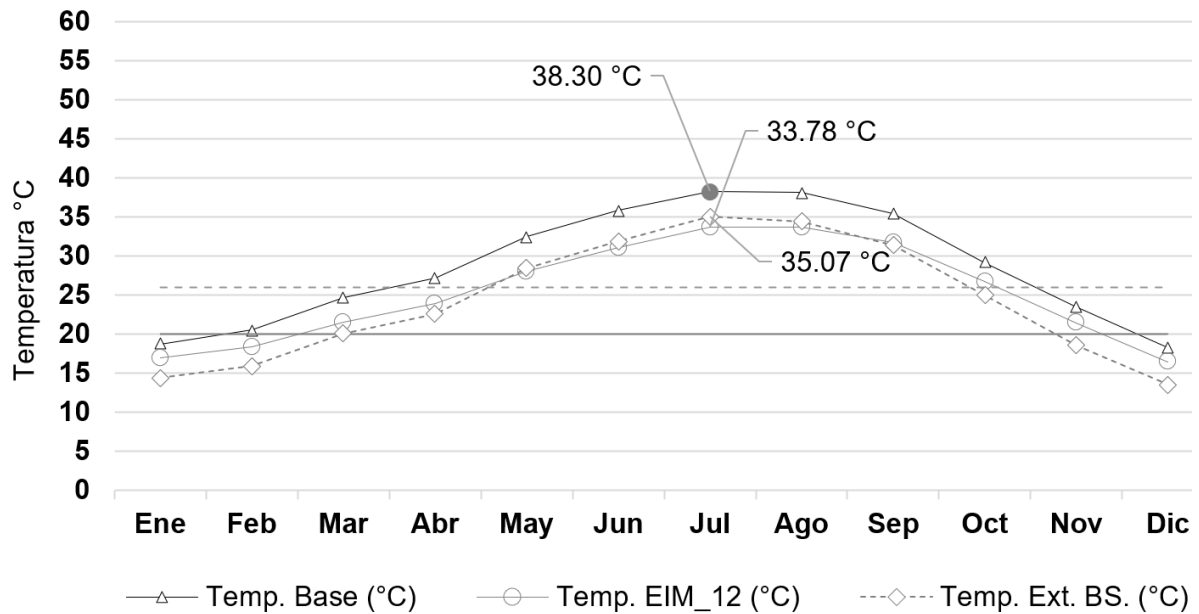
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.1.2 Escenario EIM_12 – Poliuretano 4”

Incorporar un sistema de aislamiento térmico con espuma de poliuretano de 4 pulgadas de espesor sobre la cubierta permitió obtener reducciones térmicas de mayor magnitud respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior descendió a $33.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que representa una disminución de $-4.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente al modelo base ($38.30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las reducciones más amplias se registraron en junio ($-4.69\text{ }^{\circ}\text{C}$), mayo ($-4.43\text{ }^{\circ}\text{C}$) y agosto ($-4.40\text{ }^{\circ}\text{C}$). La reducción promedio anual fue de $-2.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que, durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), el promedio de disminución térmica alcanzó $-4.35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 27, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 27. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_12 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Fibra de vidrio

Este escenario corresponde a la aplicación de una capa de fibra de vidrio con un espesor de 5 pulgadas sobre la cubierta del edificio. La intervención se simuló con base en las condiciones térmicas, geométricas y climáticas previamente establecidas para el modelo base.

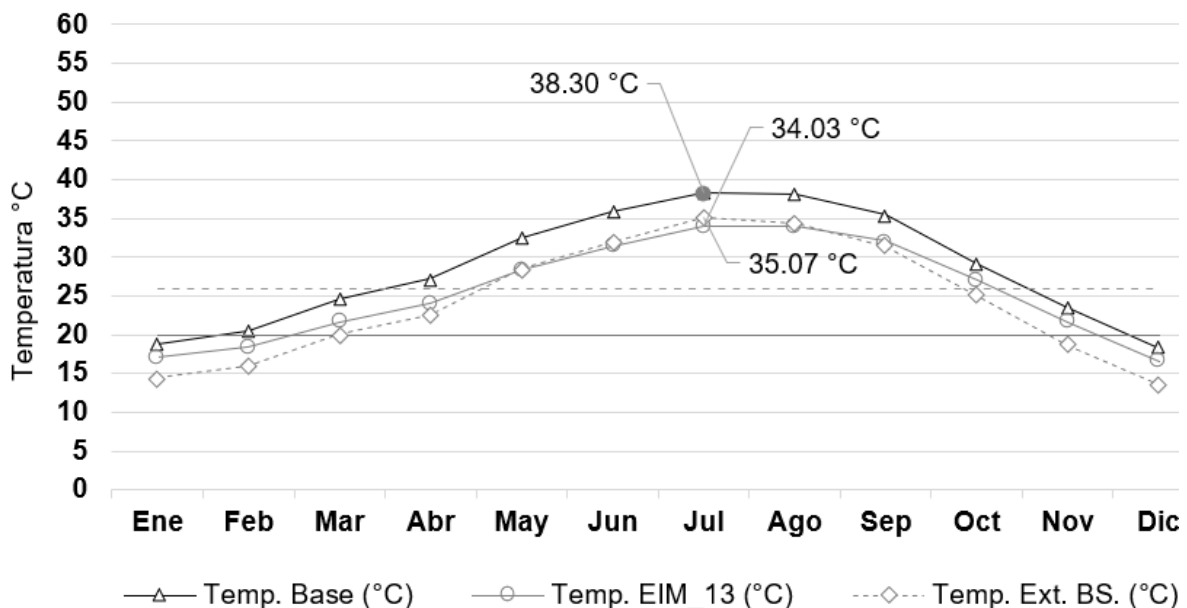
La comparación mensual entre ambos escenarios permite documentar las variaciones en la temperatura operativa interior atribuibles al aislamiento con este material.

4.1.2.1.3 Escenario EIM_13 – Fibra de vidrio 5”

Aplicar un sistema de aislamiento térmico en cubierta a base de fibra de vidrio de 5 pulgadas de espesor permitió reducir de forma consistente la temperatura operativa interior frente al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 34.03 °C, lo que representa una disminución de -4.27 °C respecto al modelo base (38.30 °C). Las reducciones máximas se observaron en junio (-4.46 °C), seguidas de mayo (-4.19 °C) y agosto (-4.14 °C). El promedio anual de reducción fue de -2.88 °C, mientras que durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), la disminución promedio ascendió a -4.09 °C.

La figura 28, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 28. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_13 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Celulosa 4”

Este escenario presenta los resultados obtenidos al aplicar una capa de celulosa con un espesor de 4 pulgadas sobre la superficie de la cubierta. La

configuración térmica del modelo base se conservó sin modificaciones, bajo condiciones de simulación equivalentes a las de los escenarios anteriores.

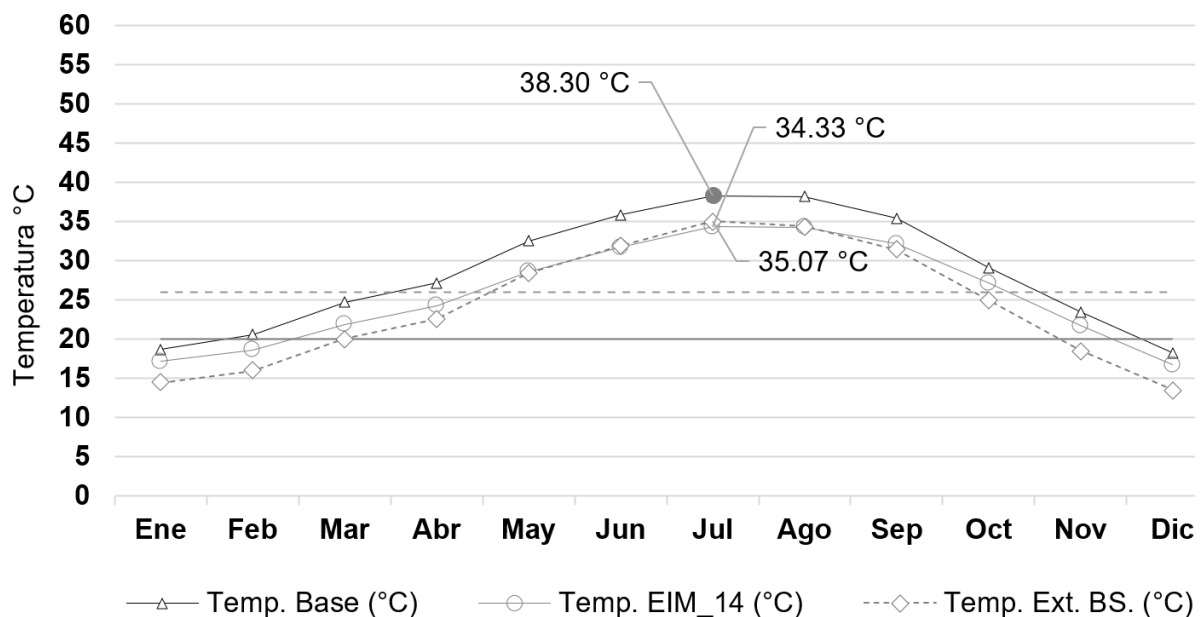
La información presentada a continuación documenta las variaciones mensuales de temperatura operativa interior frente al escenario base.

4.1.2.1.4 Escenario EIM_14 – Celulosa 4”

La incorporación de un sistema de aislamiento térmico en cubierta a base de celulosa insuflada de 4 pulgadas de espesor permitió una reducción térmica uniforme y elevada durante el periodo anual. En julio, la temperatura operativa interior se redujo a 34.33 °C, lo que representa una disminución de –3.97 °C respecto al modelo base (38.30 °C). Las reducciones más pronunciadas se registraron en junio (–4.13 °C), seguido de mayo (–3.90 °C) y agosto (–3.86 °C). El promedio de reducción anual fue de –2.73 °C, mientras que, durante el periodo crítico (mayo a septiembre), la reducción promedio alcanzó –3.81 °C.

La figura 29, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 29. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_14 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Aislamiento con poliestireno expandido 1.5" en cubierta

Este escenario presenta los resultados obtenidos al aplicar una capa de poliestireno expandido (EPS) con espesor de 1.5 pulgadas sobre la superficie de la cubierta. La simulación se realizó con base en las condiciones térmicas, geométricas y operativas previamente establecidas para el modelo base.

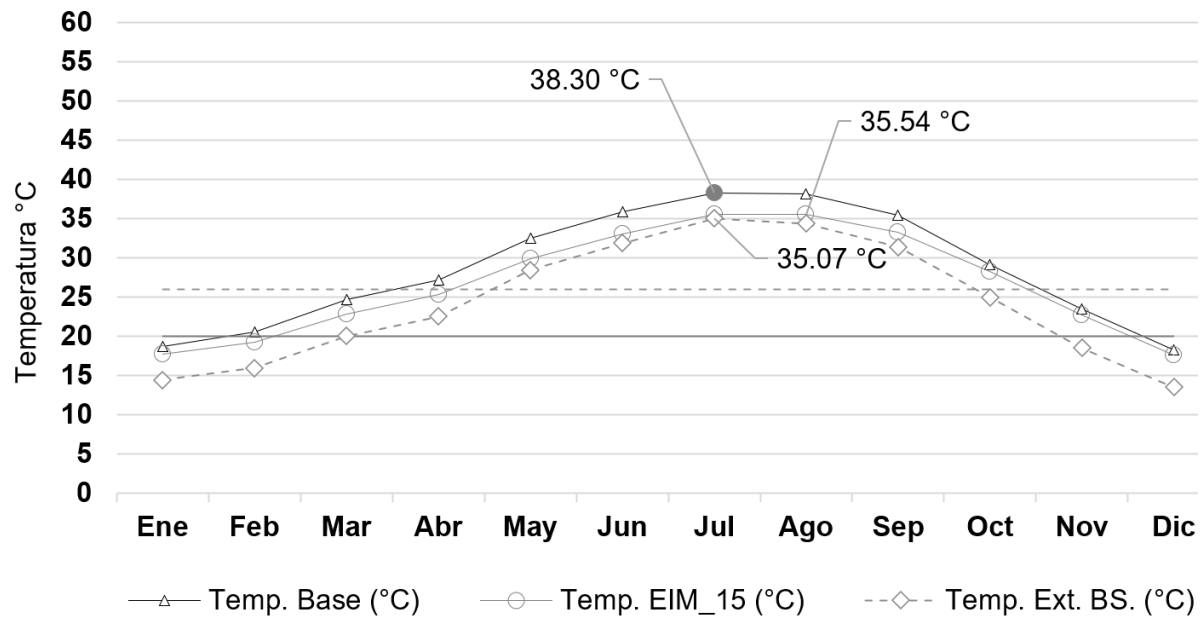
A continuación, se presentan las diferencias mensuales en temperatura operativa interior frente al escenario base.

4.1.2.1.5 Escenario EIM_15 – Poliestireno expandido 1.5"

La aplicación de un sistema de aislamiento térmico de poliestireno expandido (EPS) con espesor de 1.5 pulgadas sobre la cubierta generó reducciones térmicas constantes durante todo el periodo simulado. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 35.59 °C, lo que representa una disminución de -2.71 °C respecto al escenario base (38.30 °C). Las reducciones más relevantes se registraron en junio (-2.82 °C), mayo (-2.57 °C) y agosto (-2.62 °C). La reducción promedio anual fue de -1.76 °C, mientras que, durante el periodo crítico (mayo a septiembre), la reducción promedio ascendió a -2.57 °C.

La figura 30, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior en ambos escenarios.

Figura 30. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_15 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.1.6 Comparación global: Aislamientos térmicos en cubierta

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_11 a EIM_15 con el propósito de establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la aplicación de diversos materiales de aislamiento sobre la cubierta del caso de estudio.

Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 51, que presenta las reducciones térmicas mensuales alcanzadas por cada escenario respecto al modelo base.

Tabla 52.

Evolución anual de temperatura operativa: EIM_11–EIM_15 vs. escenario base.

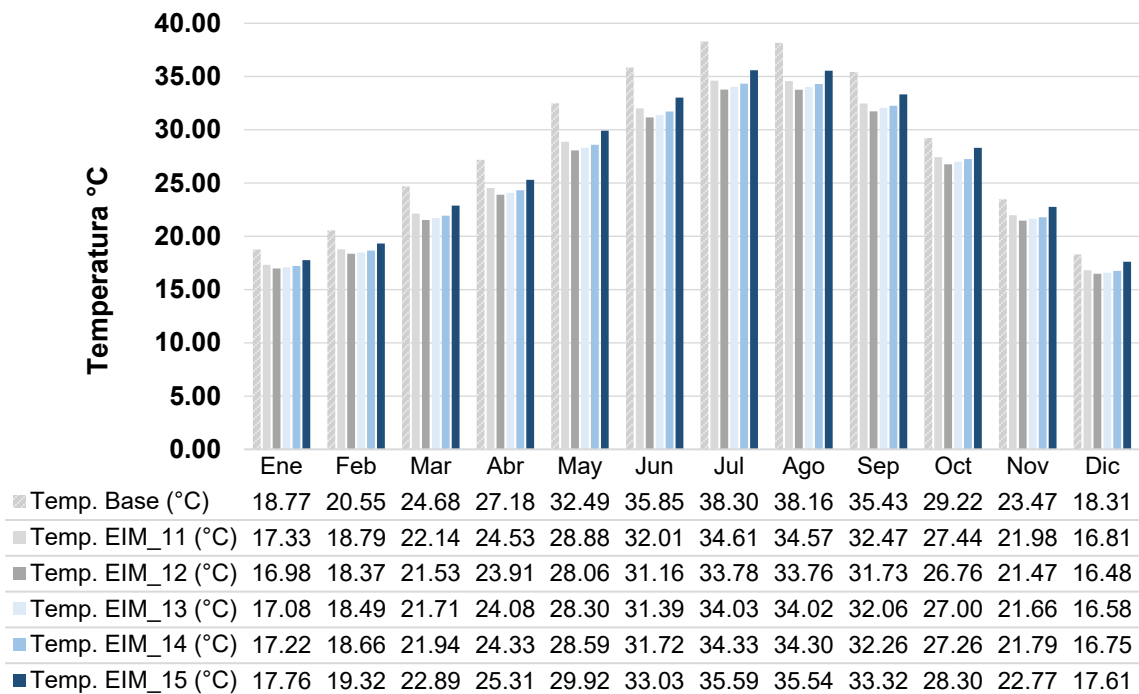
Mes	ΔT EIM_11 (°C)	ΔT EIM_12 (°C)	ΔT EIM_13 (°C)	ΔT EIM_14 (°C)	ΔT EIM_15 (°C)
Mayo	3.61	4.43	4.19	3.90	2.57
Junio	3.84	4.69	4.46	4.13	2.82

Julio	3.69	4.52	4.27	3.97	2.71
Agosto	3.59	4.40	4.14	3.86	2.62
Septiembre	3.47	4.24	4.00	3.75	2.55

Nota: EIM_11: Poliuretano 2"; EIM_12: Poliuretano 4"; EIM_13: Fibra de vidrio 5"; EIM_14: Celulosa 4"; EIM_15: Poliestireno expandido 1.5"; elaboración propia (2025).

La figura 31, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo las cinco configuraciones de aislamiento. A lo largo del ciclo anual, todos los tratamientos muestran reducciones térmicas claras en comparación con el escenario base, observándose mayores diferencias conforme aumenta la capacidad aislante del material empleado.

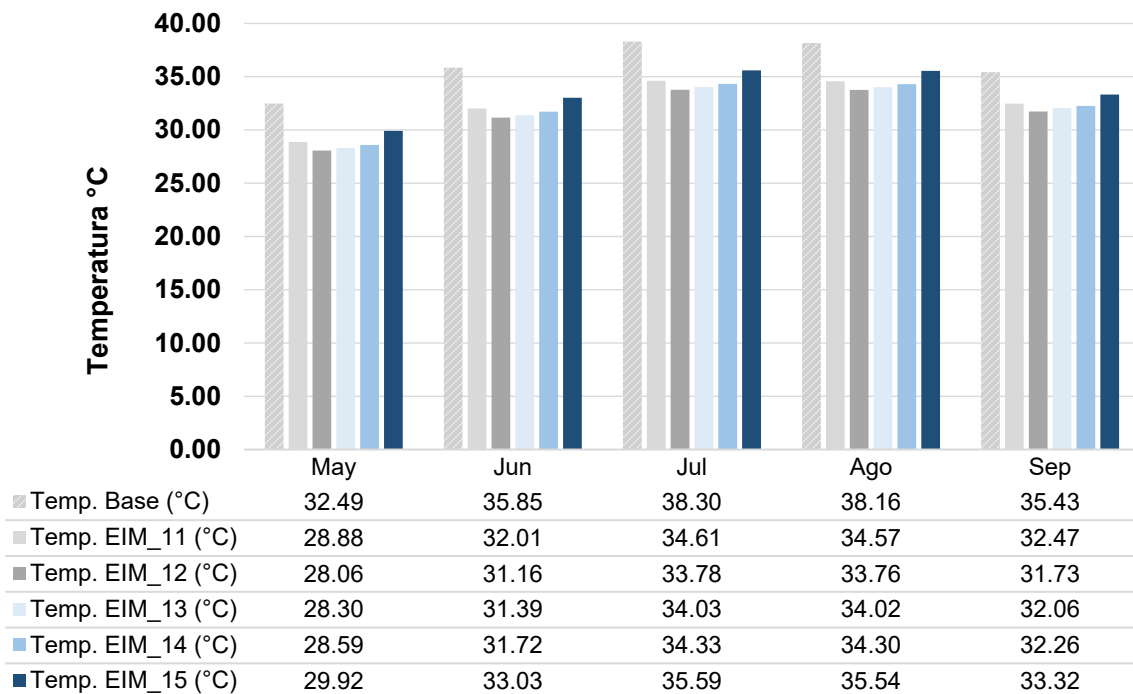
Figura 31. Comparación crítica (mayo-septiembre) de temperatura operativa: EIM_11–EIM_15 vs. escenario base.



Nota: EIM_11: Poliuretano 2"; EIM_12: Poliuretano 4"; EIM_13: Fibra de vidrio 5"; EIM_14: Celulosa 4"; EIM_15: Poliestireno expandido 1.5"; elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, se amplifican las diferencias observadas entre los distintos materiales y espesores de aislamiento, como sintetiza la figura 31.

Figura 32. Temperatura operativa mensual: EIM_11–EIM_15 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), se acentúan las diferencias térmicas registradas entre los materiales evaluados, en función directa de su capacidad aislante. Los escenarios de poliuretano (EIM_11 y EIM_12) presentaron las reducciones más significativas, destacando el efecto acumulativo del espesor al alcanzar $-4.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ con 4 pulgadas de aplicación (EIM_12). Este comportamiento confirma la elevada eficiencia térmica del poliuretano, asociada a su baja conductividad térmica ($\approx 0.025\text{ W/m}\cdot\text{K}$) y su reducido espesor crítico para alcanzar estabilización térmica, como lo describe Givoni (1994) en envolventes ligeras.

En segundo orden de desempeño térmico se ubicó la fibra de vidrio (EIM_13), cuyo comportamiento se aproximó al del poliuretano a pesar de su mayor espesor (5"). Este resultado es coherente con su conductividad ligeramente superior ($\approx 0.038\text{ W/m}\cdot\text{K}$), evidenciando que, aun con mayores espesores, el gradiente de eficiencia

marginal comienza a reducirse, fenómeno que Olgay (1963) ya había documentado en la relación no lineal entre espesor adicional y ganancia térmica evitada en sistemas pasivos.

La celulosa (EIM_14) mostró reducciones cercanas a la fibra de vidrio, aportando adicionalmente un efecto secundario de amortiguamiento térmico derivado de su capacidad de almacenamiento térmico intersticial, propiedad que Szokolay (2014) destaca como relevante para climas secos donde los gradientes térmicos diurnos son amplios.

Por último, el poliestireno expandido (EIM_15), aun con buena conductividad térmica ($\approx 0.035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), mostró el desempeño más limitado en términos absolutos, resultado atribuible a su reducido espesor de 1.5", claramente insuficiente para este tipo de clima cuando no se combina con estrategias complementarias.

Los resultados obtenidos validan cuantitativamente lo expuesto por Yaman (2025), quien, mediante optimización numérica en naves industriales ligeras, identificó reducciones superiores a 4 °C cuando se emplean configuraciones de alta resistencia térmica y espesores mayores, hallazgo coincidente con los escenarios EIM_12 y EIM_13 en el presente estudio.

Tabla 53. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_11 – EIM_15.

Indicador	EIM_11	EIM_12	EIM_13	EIM_14	EIM_15
Material aplicado	Poliuretano	Poliuretano	Fibra de vidrio	Celulosa	Poliestireno expandido
Espesor (pulgadas)	2"	4"	5"	4"	1.5"
Conductividad térmica (W/m·K)	0.025	0.025	0.038	0.040	0.035
Reducción térmica máxima (°C)	3.84	4.69	4.46	4.13	2.82
Mes de mayor reducción	Junio	Junio	Junio	Junio	Junio

Indicador	EIM_11	EIM_12	EIM_13	EIM_14	EIM_15
Aspecto térmico	Reducción alta	Reducción superior	Reducción alta	Reducción alta	Reducción moderada
Paramentos intervenidos	Cubierta	Cubierta	Cubierta	Cubierta	Cubierta

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.2 Aislamiento en muros

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan sistemas de aislamiento térmico aplicados sobre los muros perimetrales del edificio. Se evaluaron configuraciones según material y espesor: EIM_16 (EPS 1”), EIM_17 (EPS 3”), EIM_18 (Celulosa 2”) y EIM_19 (Celulosa 4”). Las intervenciones se limitaron a la modificación de las propiedades térmicas de los muros, manteniéndose constantes las condiciones geométricas, funcionales y operativas del modelo base. Se documenta el comportamiento térmico individual de cada escenario respecto al escenario base, seguido del análisis comparativo global.

Aislamiento con poliestireno expandido (EPS)

Este subgrupo incluye los escenarios EIM_16 y EIM_17, con espesores de 1” y 3” respectivamente, aplicados sobre los muros perimetrales.

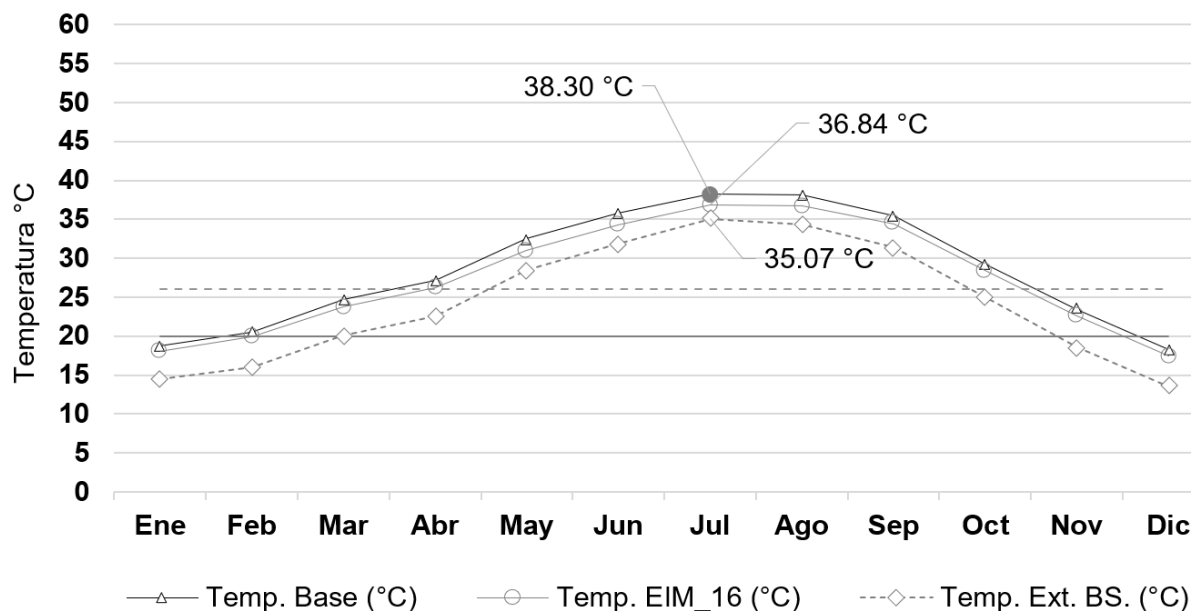
4.1.2.2.1 Escenario EIM_16 – EPS 1”

Aplicar un sistema de aislamiento térmico de poliestireno expandido (EPS) de 1” sobre los muros perimetrales generó reducciones térmicas moderadas respecto al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior descendió a 36.84 °C, equivalente a una disminución de –1.46 °C respecto al modelo base (38.30 °C). Las reducciones más altas se registraron en junio (–1.52 °C), mayo (–1.47 °C) y agosto (–1.43 °C). La reducción promedio anual fue de –0.96 °C, mientras que durante el

periodo de mayor carga térmica (mayo a septiembre) el promedio de reducción alcanzó $-1.37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 33, muestra el comportamiento mensual de la temperatura operativa interior, donde se aprecia una separación consistente entre la curva del escenario EIM_16 y el modelo base.

Figura 33. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_16 vs. escenario base.



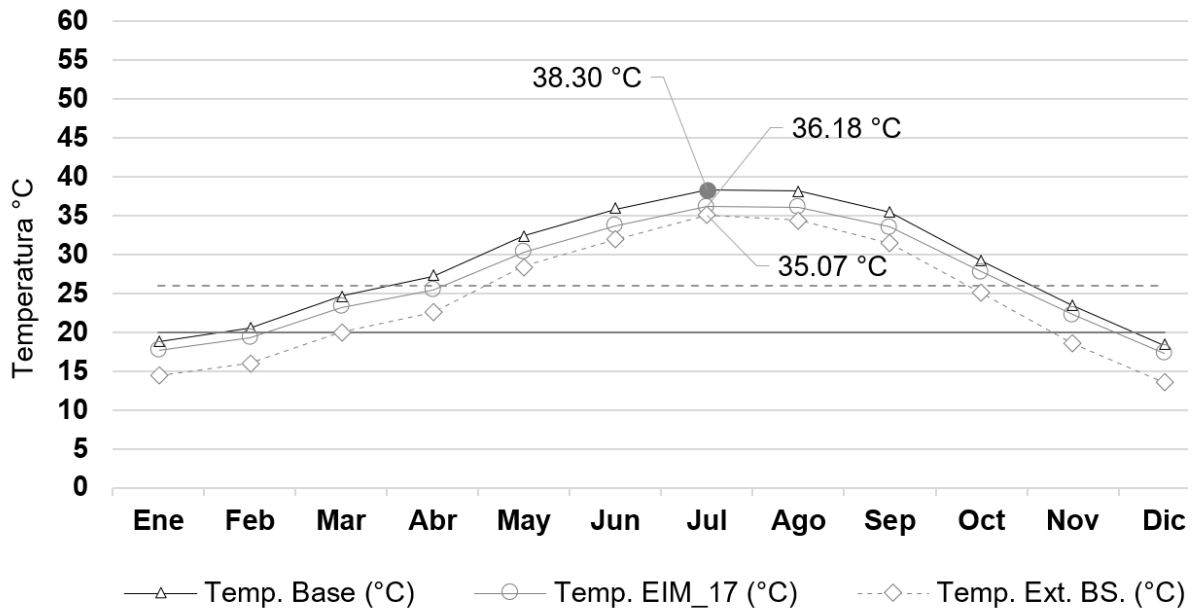
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.2.2 Escenario EIM_17 – EPS 3”

Incrementar el espesor de EPS a 3” en los muros perimetrales permitió obtener reducciones térmicas superiores. En julio, la temperatura operativa interior descendió a $36.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondiente a una disminución de $-2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente al escenario base. Las mayores reducciones se registraron en junio ($-2.19\text{ }^{\circ}\text{C}$), mayo ($-2.13\text{ }^{\circ}\text{C}$) y agosto ($-2.09\text{ }^{\circ}\text{C}$). El promedio anual de reducción fue de $-1.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ y durante el periodo crítico (mayo a septiembre), la reducción promedio alcanzó $-2.07\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 34, evidencia un desplazamiento constante de la curva de temperatura operativa respecto al modelo base, con mayor efecto durante los meses cálidos.

Figura 34. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_17 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

b) Celulosa proyectada en muros

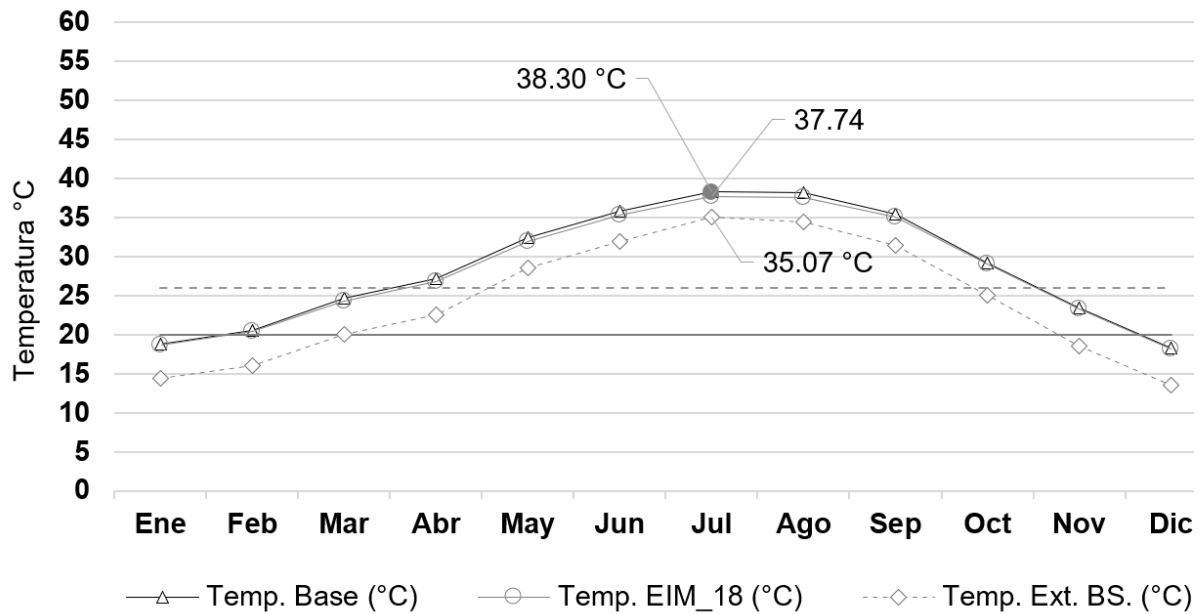
Este subgrupo comprende los escenarios EIM_18 y EIM_19, con espesores de 2" y 4" respectivamente.

4.1.2.2.3 Escenario EIM_18 – Celulosa 2"

Aplicar celulosa insuflada de 2" sobre los muros perimetrales generó reducciones térmicas limitadas frente al escenario base. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 37.74 °C, lo que representa una disminución de -0.56 °C respecto al modelo base. Las mayores reducciones se presentaron en junio (-0.57 °C) y agosto (-0.53 °C). El promedio anual de reducción fue de -0.32 °C, mientras que en el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), la reducción promedio fue de -0.51 °C.

La figura 35, muestra una separación ligera pero constante entre la curva del escenario EIM_18 y la del modelo base.

Figura 35. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_18 vs. escenario base.



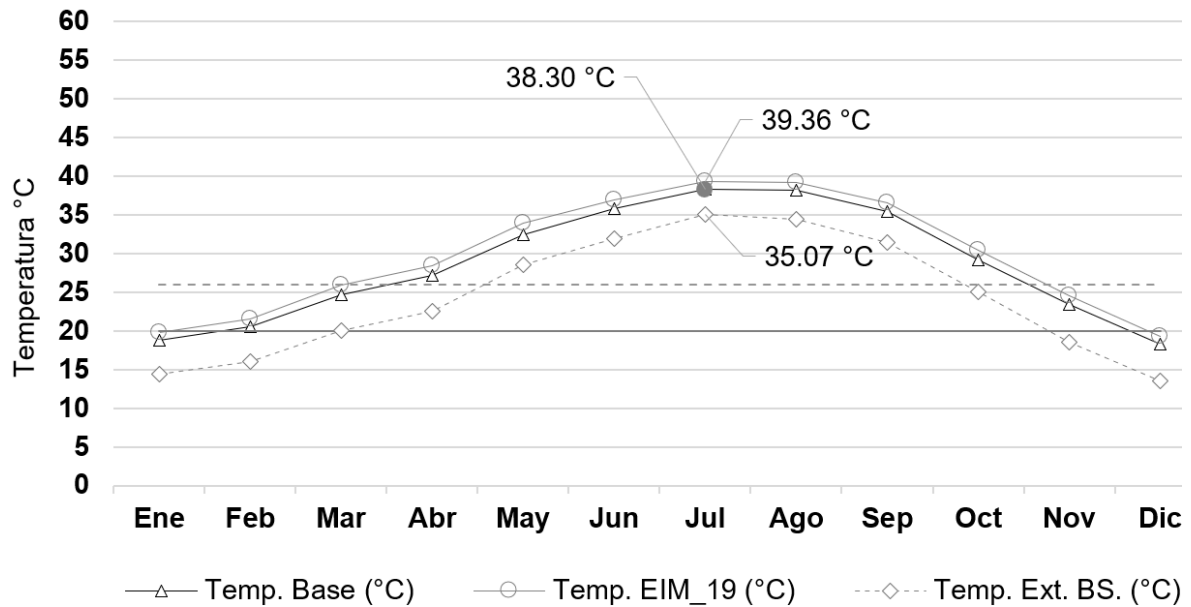
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.2.4 Escenario EIM_19 – Celulosa 4”

La incorporación de celulosa insuflada de 4” sobre los muros mostró un comportamiento térmico inverso al esperado, con incrementos sostenidos de temperatura. En julio, la temperatura operativa interior ascendió a 39.36 °C, es decir, un aumento de 1.06 °C respecto al escenario base. Los incrementos máximos se observaron en mayo (1.39 °C), seguido de abril (1.24 °C). El promedio anual de incremento fue de 1.11 °C y, durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), el incremento promedio fue de 1.14 °C.

La figura 36, confirma este comportamiento, al mostrar la curva del escenario EIM_19 por encima del modelo base en todos los meses.

Figura 36. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_19 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2.2.5 Comparación global: Aislamiento térmico en muros

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_16 a EIM_19, con el objetivo de establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la incorporación de diversos materiales y espesores de aislamiento sobre los muros perimetrales del caso de estudio.

Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 53.

Tabla 54. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_16 – EIM_19.

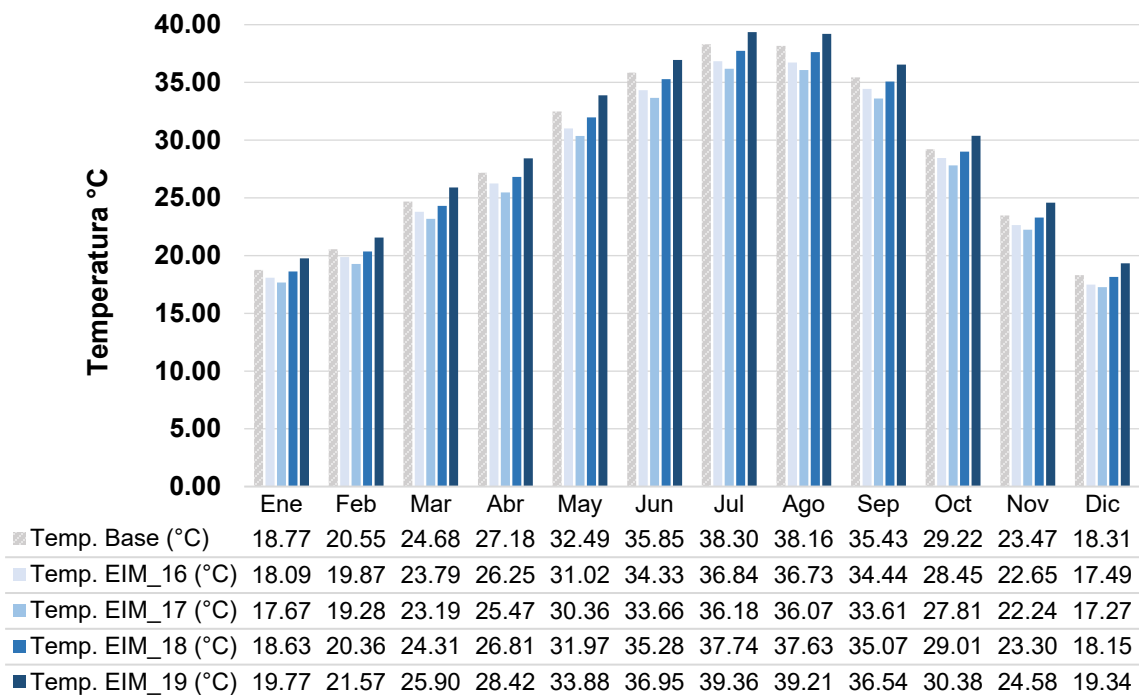
Mes	ΔT EIM_16 (°C)	ΔT EIM_17 (°C)	ΔT EIM_18 (°C)	ΔT EIM_19 (°C)
Mayo	-1.47	-2.13	-0.52	+1.39
Junio	-1.52	-2.19	-0.57	+1.10
Julio	-1.46	-2.12	-0.56	+1.06

Agosto	-1.43	-2.09	-0.53	+1.05
Septiembre	-0.99	-1.82	-0.33	+1.11

Nota: EIM_16: EPS 1" (muros); EIM_17: EPS 3" (muros); EIM_18: Celulosa 2" (muros); EIM_19: Celulosa 4" (muros); elaboración propia (2025).

La figura 37, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo las distintas configuraciones. En general, los escenarios con aislamiento perimetral mostraron reducciones térmicas progresivas conforme aumentó el espesor y la resistencia térmica del material, con excepción del escenario EIM_19, donde se documentó un comportamiento opuesto.

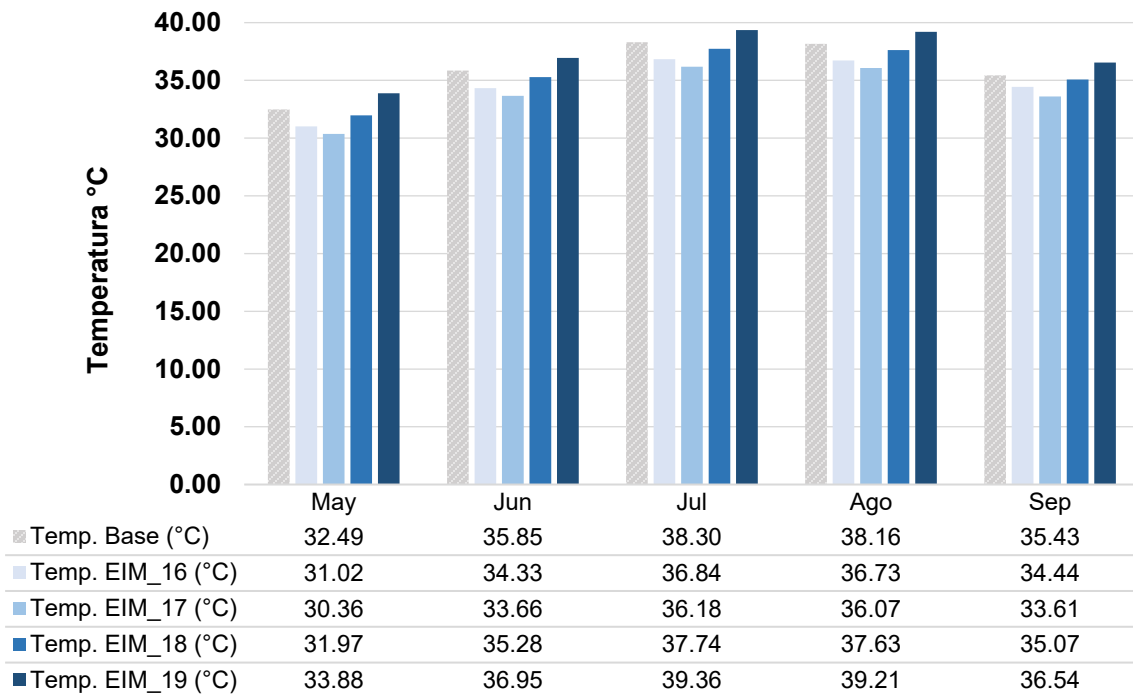
Figura 37. Temperatura operativa mensual: EIM_16–EIM_19 vs. escenario base



Nota: EIM_16: EPS 1" (muros); EIM_17: EPS 3" (muros); EIM_18: Celulosa 2" (muros); EIM_19: Celulosa 4" (muros); elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, se amplifican las diferencias observadas entre los escenarios, como sintetiza la figura 38.

Figura 38. Temperatura operativa mensual: EIM_16–EIM_19 vs. escenario base



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), los resultados obtenidos en los escenarios de aislamiento térmico en muros evidenciaron comportamientos diferenciados, directamente asociados al tipo de material, espesor aplicado y características térmicas propias de la envolvente vertical. El poliestireno expandido de 1" (EIM_16) redujo la temperatura operativa entre $-1.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.99\text{ }^{\circ}\text{C}$, presentando una respuesta estable pero limitada, atribuible al bajo espesor aplicado. Al incrementar el espesor a 3" (EIM_17), el EPS alcanzó el mejor desempeño del bloque, con reducciones máximas de hasta $-2.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ en junio, comportamiento coherente con su baja conductividad térmica ($\approx 0.035\text{ W/m}\cdot\text{K}$) y su alta eficiencia bajo gradientes térmicos moderados, típicos de los muros perimetrales en climas cálido secos.

En contraste, el aislamiento con celulosa a 2" (EIM_18) mostró reducciones discretas, del orden de $-0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$, efecto condicionado tanto por su mayor conductividad térmica ($\approx 0.040\text{ W/m}\cdot\text{K}$) como por la limitada capacidad de almacenamiento térmico superficial a este espesor, lo que redujo su eficacia aislante frente a la radiación solar directa incidente sobre los paramentos verticales. La incorporación de celulosa a 4" (EIM_19) generó un comportamiento inverso, con incrementos sostenidos de temperatura operativa, alcanzando hasta $1.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ en mayo. Este fenómeno refleja un sobredimensionamiento del aislamiento, el cual inhibe los intercambios térmicos dinámicos superficiales necesarios para favorecer la disipación parcial de carga térmica acumulada durante el ciclo diurno-nocturno

A diferencia de las cubiertas expuestas, donde los mecanismos de disipación nocturna por radiación al cielo abierto permiten un balance térmico más favorable aun con espesores elevados, los muros verticales presentan una vista efectiva reducida al firmamento nocturno, limitando así su capacidad de descarga radiativa. Este efecto explica la inversión térmica registrada en el EIM_19, donde el exceso de aislamiento restringe el intercambio superficial nocturno, lo que favorece la acumulación progresiva de calor en el volumen interior. Dicho comportamiento resulta plenamente coherente con lo planteado por Szokolay (2014) y Givoni (1994), quienes advierten que, en climas cálido secos, espesores excesivos de aislamiento aplicados a sistemas verticales pueden inducir acumulación térmica interior si no se acompañan de mecanismos adicionales de disipación o control de carga interna.

Dentro de los estudios revisados en el estado del arte de la presente investigación, no se identificaron trabajos experimentales o numéricos que analicen de forma diferenciada la aplicación exclusiva de aislamiento térmico en muros perimetrales de naves industriales ligeras. Sin embargo, los resultados observados mantienen plena consistencia con los principios físicos documentados por Givoni (1994), Olgyay (1963), Szokolay (2014) y La Roche (2011), en relación al comportamiento térmico de la masa superficial, el balance dinámico de cargas y la respuesta diferenciada de los elementos verticales bajo gradientes térmicos extremos.

Las diferencias constructivas y operativas asociadas a cada tratamiento se sintetizan en la tabla 54.

Tabla 55. Reducción o incremento mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_16 – EIM_19

Indicador	EIM_16	EIM_17	EIM_18	EIM_19
Material aplicado	Poliestireno expandido	Poliestireno expandido	Celulosa proyectada	Celulosa proyectada
Espesor (pulgadas)	1"	3"	2"	4"
Conductividad térmica (W/m·K)	0.035	0.035	0.040	0.040
Reducción térmica máxima (°C)	-1.47 a -0.99	-2.19 (junio)	-0.52 a -0.33	+1.39 (mayo)
Aspecto térmico	Reducción moderada	Mejor desempeño del bloque	Reducción limitada	Inversión térmica por sobredimensionamiento
Paramentos intervenidos	Muros perimetrales	Muros perimetrales	Muros perimetrales	Muros perimetrales

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3 Estrategias de disipación de calor

Este apartado presenta los resultados obtenidos en los escenarios que incorporan estrategias pasivas orientadas a facilitar la disipación del calor acumulado en el interior del edificio. Las soluciones simuladas emplean mecanismos naturales de extracción de aire sin intervención de sistemas mecánicos activos, manteniendo constante el resto de las condiciones térmicas del modelo base validado.

Las estrategias evaluadas se agrupan en dos categorías: aperturas operables en el frente vertical este del volumen elevado, con distintos porcentajes y modalidades de operación (diurna, nocturna y combinada); y dispositivos de extracción pasiva

dispuestos en cubierta o muros perimetrales, como chimeneas solares, extractores eólicos pasivos, rejillas cruzadas y tragaluces ventilados.

Tabla 56. Escenarios de disipación de calor simulados. Tipo de intervención y componente arquitectónico involucrado.

ID	Clasificación	Elemento intervenido
EIM_20	Apertura operable 10 % + acristalamiento 20 % + sombreado	Frente este de cubierta
EIM_21	Apertura operable 20 % + acristalamiento 20 % + sombreado	Frente este de cubierta
EIM_22	Apertura operable 40 % + acristalamiento 20 % + sombreado	Frente este de cubierta
EIM_23	Apertura operable 60 % + acristalamiento 20 % + sombreado	Frente este de cubierta
EIM_24	Apertura 40 % operable nocturna + acristalamiento 20 %	Frente este de cubierta
EIM_25	Apertura 60 % operable nocturna + acristalamiento 20 %	Frente este de cubierta
EIM_26	Apertura 40 % operable combinada + acristalamiento 20 %	Frente este de cubierta
EIM_27	Chimenea solar pasiva	Cubierta
EIM_28	Extractores eólicos pasivos	Cubierta
EIM_29	Rejillas ventiladas (superior e inferior)	Frente este de cubierta
EIM_30	Tragaluz ventilado	Cubierta

Nota: Elaboración propia (2025).

Los escenarios presentados constituyen la base técnica para la evaluación del comportamiento térmico interior bajo condiciones de disipación pasiva del calor. La comparación mensual respecto al escenario base permite documentar su efecto en la temperatura operativa, como parte del conjunto de estrategias de rehabilitación energética simuladas.

4.1.3.1 Aperturas controladas en el frente vertical de cubierta acristalado

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan sistemas de apertura operable en el frente vertical de cubierta, orientado al Este. Las intervenciones combinan acristalamiento de baja transmitancia solar (20 %), sombreado exterior fijo y diferentes porcentajes de apertura activada exclusivamente durante el periodo diurno. Las condiciones geométricas, operativas y térmicas del modelo base validado se mantuvieron constantes, permitiendo aislar el efecto específico de las aperturas sobre el comportamiento térmico interior.

Ventilación diurna mediante apertura operable

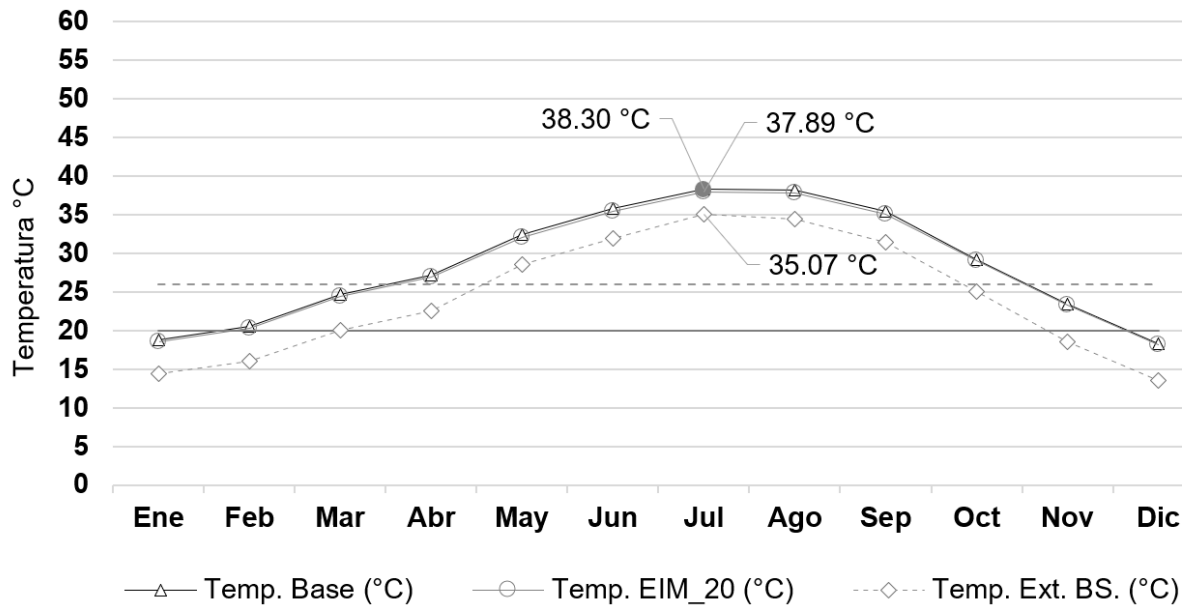
Se evaluaron porcentajes de apertura del 10 %, 20 %, 40 % y 60 %, bajo condiciones térmicas equivalentes a las del modelo base validado.

4.1.3.1.1 Escenario EIM_20 – Apertura operable 10 % + acristalamiento 20 % + sombreado

Incorporar una apertura operable equivalente al 10 % de la superficie acristalada generó reducciones térmicas leves pero constantes a lo largo del año. En julio, la temperatura operativa interior se redujo a 37.89 °C, equivalente a un descenso de -0.41 °C respecto al modelo base (38.30 °C). Las mayores reducciones se registraron entre mayo y agosto, con valores que oscilaron entre -0.38 °C y -0.39 °C. El promedio anual de disminución fue de -0.26 °C, y durante el periodo crítico (mayo a septiembre), la reducción promedio alcanzó -0.37 °C.

La figura 39, ilustra una leve separación entre las curvas del escenario EIM_20 y el modelo base, especialmente en los meses cálidos.

Figura 39. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_20 vs. escenario base.



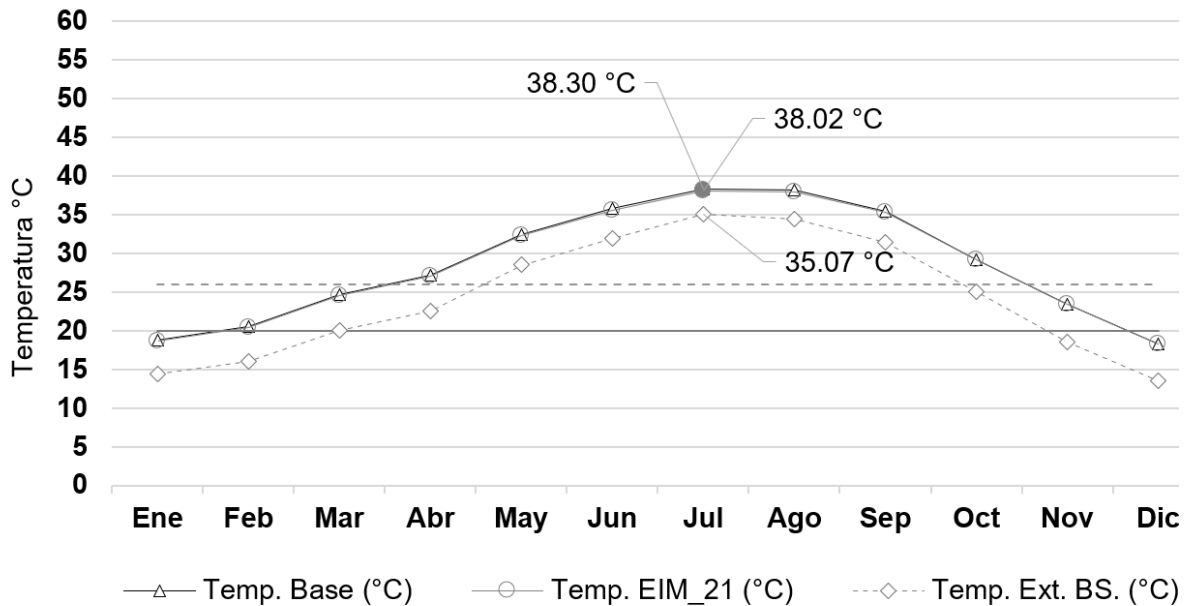
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.2 Escenario EIM_21 – Apertura operable 20 % + acristalamiento 20 % + sombreado

El incremento del área de apertura al 20 % produjo reducciones marginales de temperatura operativa. En julio, la temperatura interior descendió a 38.02 °C, correspondiente a -0.28 °C respecto al escenario base. Las reducciones térmicas mensuales oscilaron entre -0.20 °C y -0.25 °C durante los meses críticos. El promedio anual de reducción fue de -0.14 °C, y durante el periodo crítico, la disminución promedio se situó en -0.22 °C.

La figura 40, evidencia un comportamiento casi paralelo entre las curvas del EIM_21 y del modelo base.

Figura 40. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_21 vs. escenario base.



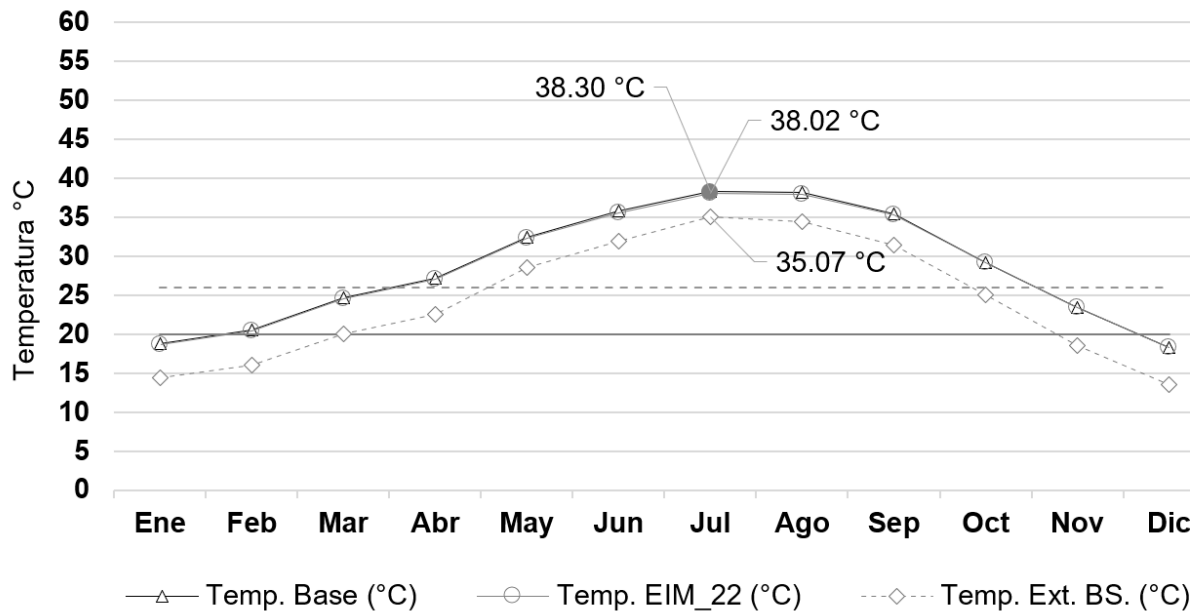
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.3 Escenario EIM_22 – Apertura operable 40 % + acristalamiento 20 % + sombreado

Al aumentar el porcentaje de apertura al 40 %, las reducciones térmicas mostraron una mejora progresiva. En julio, la temperatura operativa interior se redujo a 37.69 °C, equivalente a -0.61 °C frente al escenario base. Las reducciones más relevantes se observaron entre mayo y agosto, con descensos que oscilaron entre -0.51 °C y -0.59 °C. El promedio anual de reducción fue de -0.29 °C, mientras que durante el periodo crítico, el promedio se elevó a -0.50 °C.

La figura 41, muestra una separación clara entre las curvas del EIM_22 y el escenario base, particularmente en los meses cálidos.

Figura 41. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_22 vs. escenario base.



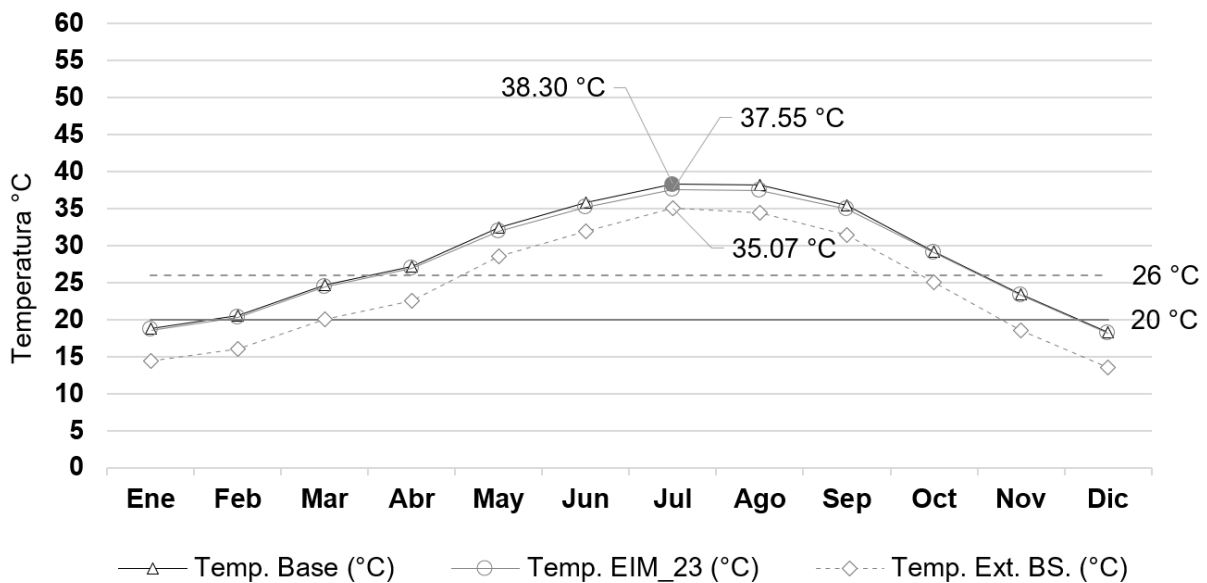
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.4 Escenario EIM_23 – Apertura operable 60% + acristalamiento 20% + sombreado

La configuración con apertura del 60% resultó la más efectiva dentro del subgrupo evaluado. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 37.55 °C, lo que representa una disminución de -0.75 °C respecto al modelo base. Las reducciones térmicas más pronunciadas se localizaron en junio (-0.70 °C), agosto (-0.72 °C) y mayo (-0.50 °C). El promedio anual de reducción fue de -0.38 °C, mientras que durante el periodo crítico alcanzó -0.63 °C.

La figura 42, evidencia una separación más clara entre la curva del escenario EIM_23 y la del modelo base durante los meses cálidos.

Figura 42. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_23 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.5 Comparación global: Aperturas controladas diurnas

Esta sección sintetiza el análisis comparativo de los escenarios EIM_20 a EIM_23, con el propósito de evaluar el efecto acumulativo de los porcentajes de apertura operable sobre la reducción térmica en el volumen interior durante los meses de mayor carga térmica.

Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la Tabla 56.

Tabla 57. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_20 – EIM_23.

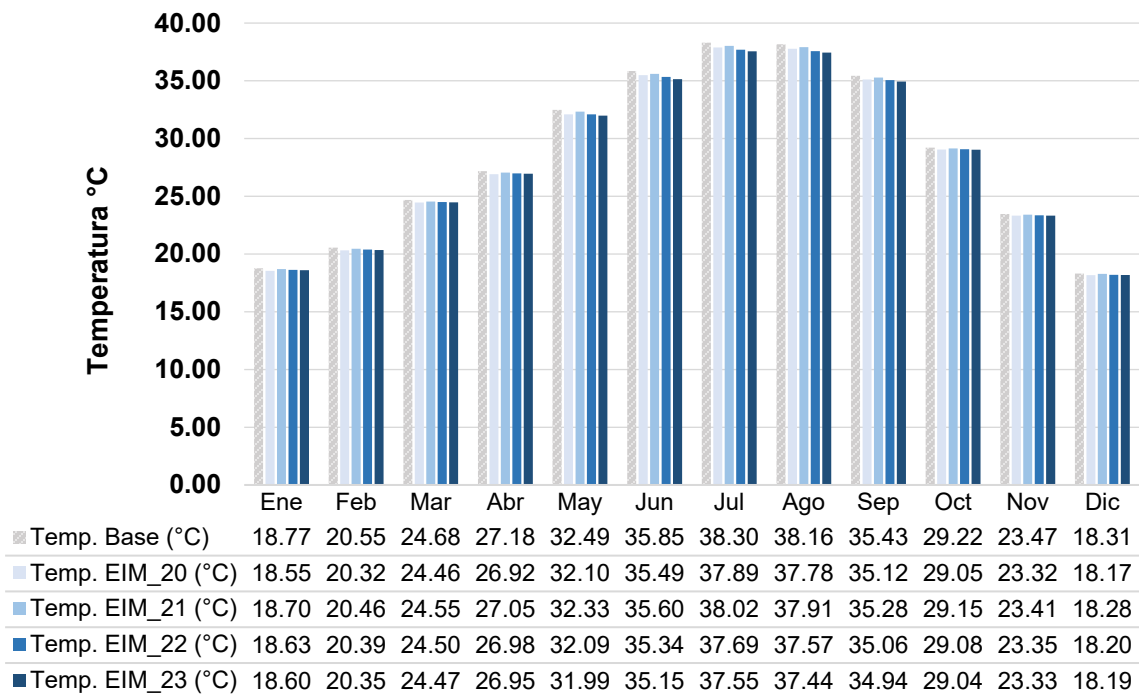
Mes	ΔT EIM_20 (°C)	ΔT EIM_21 (°C)	ΔT EIM_22 (°C)	ΔT EIM_23 (°C)
Mayo	0.39	0.25	0.40	0.50
Junio	0.36	0.25	0.55	0.70
Julio	0.41	0.28	0.61	0.75

Agosto	0.38	0.25	0.59	0.72
Septiembre	0.31	0.19	0.33	0.49

Nota: EIM_20: Apertura 10 %; EIM_21: Apertura 20 %; EIM_22: Apertura 40 %; EIM_23: Apertura 60 %; elaboración propia (2025).

La Figura 43, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior bajo las cuatro configuraciones de apertura diurna. A lo largo del ciclo anual, las diferencias térmicas se incrementan conforme aumenta el porcentaje de apertura, especialmente durante los meses cálidos.

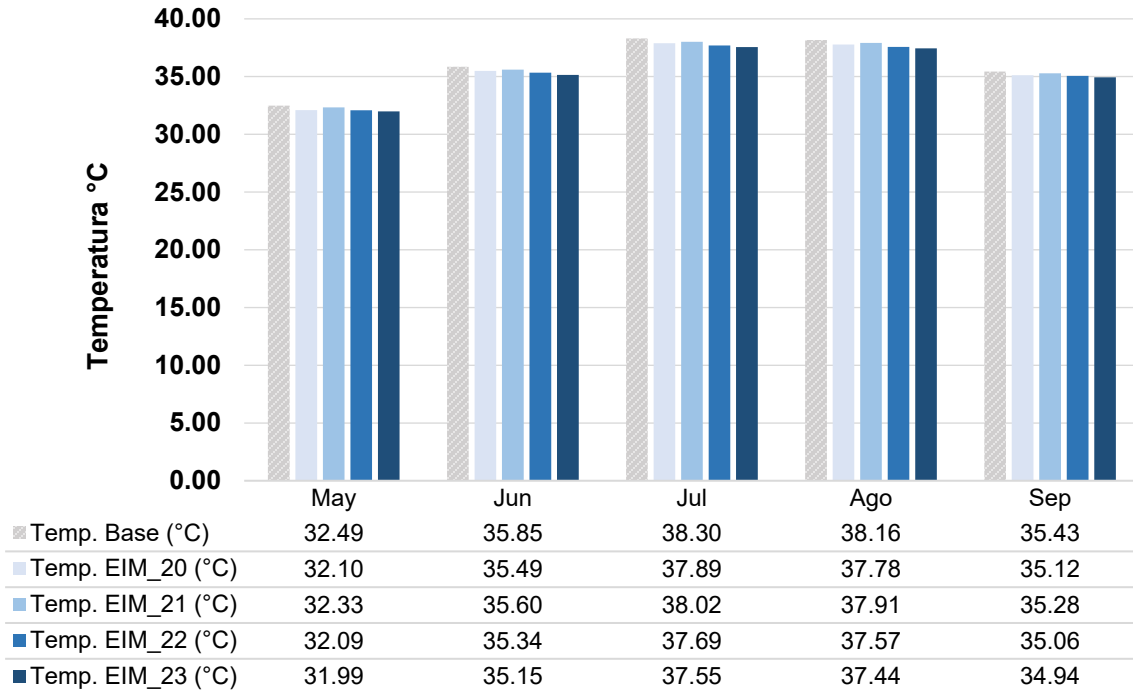
Figura 43. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_20–EIM_23 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, las diferencias de desempeño entre los escenarios se amplifican. La figura 44, sintetiza este comportamiento comparativo en los meses críticos.

Figura 44. Temperatura operativa mensual: EIM_20–EIM_23 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), el desempeño térmico evidenció una correlación directa entre el porcentaje de apertura operable y la magnitud de reducción térmica alcanzada. Los escenarios de menor apertura (EIM_20 y EIM_21) lograron reducciones discretas (≤ 0.40 °C), reflejando la limitada capacidad de ventilación natural diurna bajo porcentajes de intercambio de aire reducidos.

Al aumentar los porcentajes de apertura a 40 % (EIM_22) y 60 % (EIM_23), las reducciones térmicas alcanzaron -0.61 °C y -0.75 °C, respectivamente, evidenciando el impacto progresivo de la ventilación forzada por gradiente térmico durante las horas de mayor carga. La ventilación diurna permite evacuar parcialmente el calor sensible acumulado por radiación directa matutina sobre el frente Este.

Este comportamiento coincide con los principios documentados por Olgay (1963), Givoni (1994) y Szokolay (2014), quienes señalan que, en climas cálido-secos, el potencial de ventilación natural diurna es altamente sensible al control de flujos de aire por superficie de apertura y gradiente térmico exterior-interior.

La Tabla 57, presenta la síntesis de parámetro entre escenario EIM_20 – EIM_23.

Tabla 58. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_20 – EIM_23.

Indicador	EIM_20	EIM_21	EIM_22	EIM_23
% Apertura operable	10 %	20 %	40 %	60 %
Horario de apertura	Diurno	Diurno	Diurno	Diurno
Acristalamiento aplicado	20 % de transmitancia solar	20 % de transmitancia solar	20 % de transmitancia solar	20 % de transmitancia solar
Sombreado exterior	Dispositivo fijo (fibrocemento tratado)	Dispositivo fijo (fibrocemento tratado)	Dispositivo fijo (fibrocemento tratado)	Dispositivo fijo (fibrocemento tratado)
Reducción térmica máxima (°C)	0.41	0.28	0.61	0.75
Mes de mayor reducción	Julio	Julio	Julio	Julio
Aspecto térmico	Reducción baja	Reducción muy baja	Reducción intermedia	Reducción superior
Paramento intervenido	Frente vertical de cubierta Este	Frente vertical de cubierta Este	Frente vertical de cubierta Este	Frente vertical de cubierta Este

Nota: Elaboración propia (2025).

Ventilación nocturna y combinada mediante apertura operable

Este subgrupo presenta los resultados de los escenarios con apertura operable en el frente vertical de la cubierta con orientación Este. En todos los casos, la apertura se activa fuera del horario diurno, ya sea durante la noche o de forma continua (día y noche).

Las simulaciones se realizaron con condiciones de contorno constantes respecto al modelo base validado. La superficie acristalada corresponde al 20 % del área del frente

vertical. Las configuraciones se diferencian por el porcentaje de apertura (40 % o 60 %) y por el horario de activación.

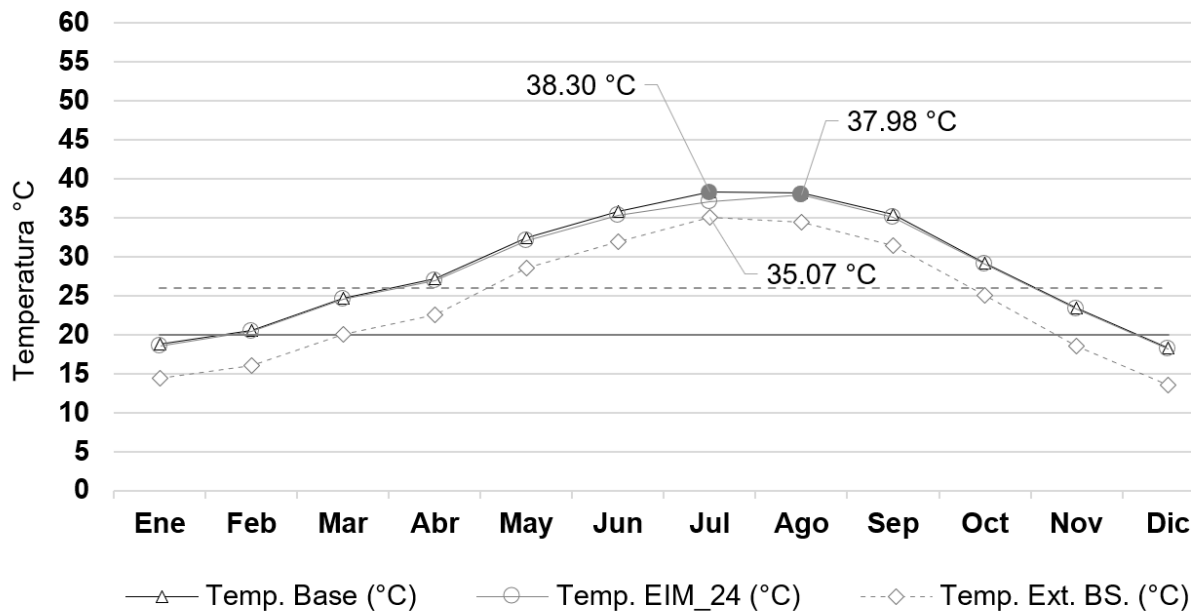
Los resultados muestran variaciones mensuales en la temperatura operativa interior respecto al escenario base. Estas diferencias corresponden a los valores obtenidos bajo condiciones de clima cálido seco extremoso.

4.1.3.1.6 Escenario EIM_24 – Apertura 40 % operable nocturna + acristalamiento 20 %

La incorporación de una apertura operable del 40 % exclusivamente en horario nocturno, combinada con acristalamiento de baja transmitancia solar (20 %), permitió obtener reducciones térmicas puntuales pero irregulares. En julio, la temperatura operativa interior descendió a 37.11 °C, lo que representa una disminución de –1.19 °C respecto al escenario base (38.30 °C). Sin embargo, en otros meses del periodo crítico el efecto fue considerablemente menor, como en agosto, donde la reducción alcanzó solo –0.18 °C. El promedio anual de disminución fue de –0.35 °C, mientras que durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre), la reducción promedio fue de –0.47 °C, influido principalmente por el descenso registrado en julio.

La Figura 45, presenta el comportamiento mensual comparativo de la temperatura operativa interior entre el EIM_24 y el modelo base.

Figura 45. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_24 vs. escenario base.



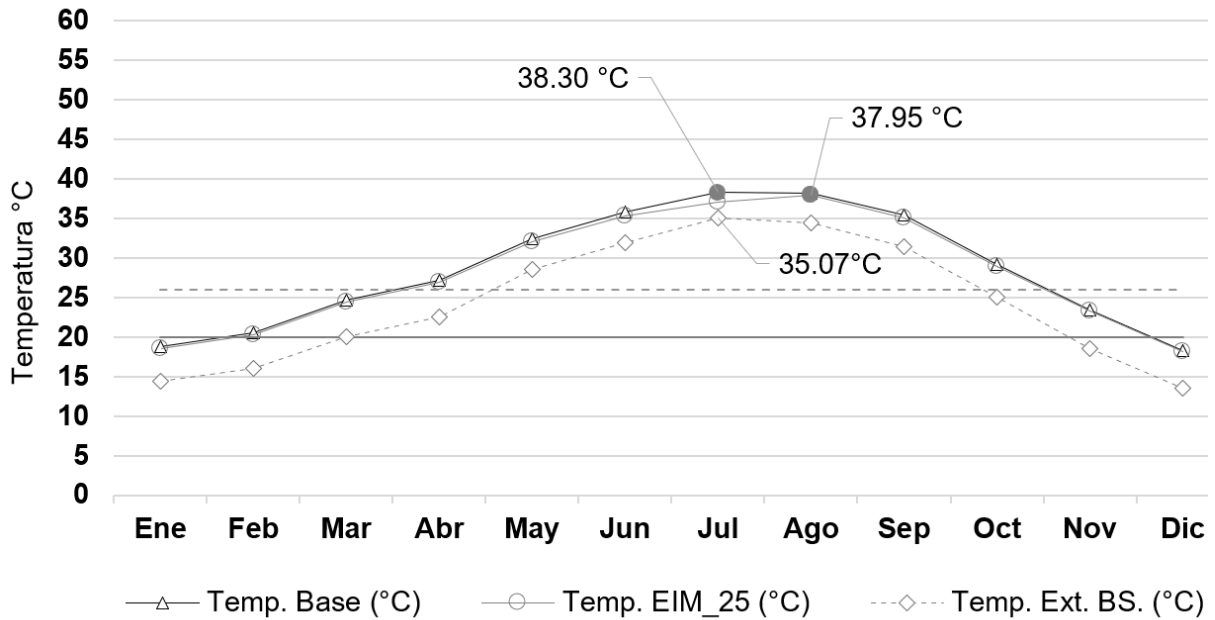
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.7 Escenario EIM_25 – Apertura 60 % operable nocturna + acristalamiento 20 %

El incremento de apertura nocturna al 60 % generó una reducción térmica ligeramente superior a la obtenida en el EIM_24. En julio, la temperatura operativa interior alcanzó 37.03 °C, representando una disminución de -1.27 °C frente al escenario base (38.30 °C), constituyendo el mejor resultado dentro de las estrategias puramente nocturnas. No obstante, el efecto mantuvo la misma irregularidad, con reducciones limitadas en otros meses, como en agosto (-0.21 °C). El promedio anual de disminución fue de -0.38 °C y durante el periodo de máxima carga térmica (mayo a septiembre) la reducción promedio fue de -0.57 °C.

La Figura 46, presenta la evolución mensual de la temperatura operativa interior comparada entre ambos escenarios.

Figura 46. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_25 vs. escenario base.



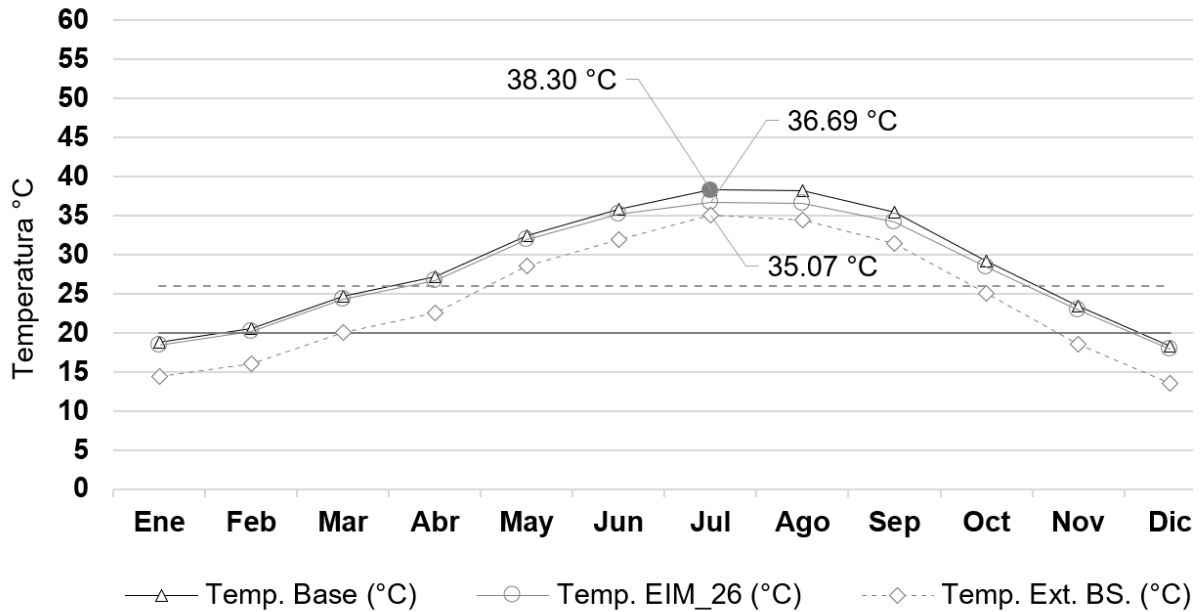
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.8 Escenario EIM_26 – Apertura 40 % operable combinada + acristalamiento 20 %

El escenario EIM_26 implementó una apertura operable del 40 % habilitada durante todo el día y la noche, en conjunto con acristalamiento de baja transmitancia solar (20 %). Esta estrategia mixta generó reducciones térmicas sostenidas y superiores al resto de los escenarios de apertura operable. En julio, la temperatura operativa interior se redujo a 36.69 °C, correspondiente a -1.61 °C respecto al escenario base (38.30 °C), mientras que en agosto la disminución fue de -1.59 °C. El promedio anual fue de -0.76 °C, y el descenso promedio durante el periodo crítico (mayo a septiembre) alcanzó -1.13 °C, el valor más favorable entre las estrategias de apertura simuladas.

La Figura 47, muestra la evolución mensual comparativa de temperatura operativa interior para este escenario.

Figura 47. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_26 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.1.9 Comparación global entre estrategias de control de apertura nocturna y combinada

Este apartado integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_24 a EIM_26, orientado a evaluar el efecto diferencial de la ventilación nocturna y combinada (día+noche) sobre la reducción térmica interior bajo condiciones de clima cálido seco extremo. Los resultados permiten establecer la respuesta de cada configuración frente al modelo base validado durante el periodo de máxima carga térmica.

Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 58.

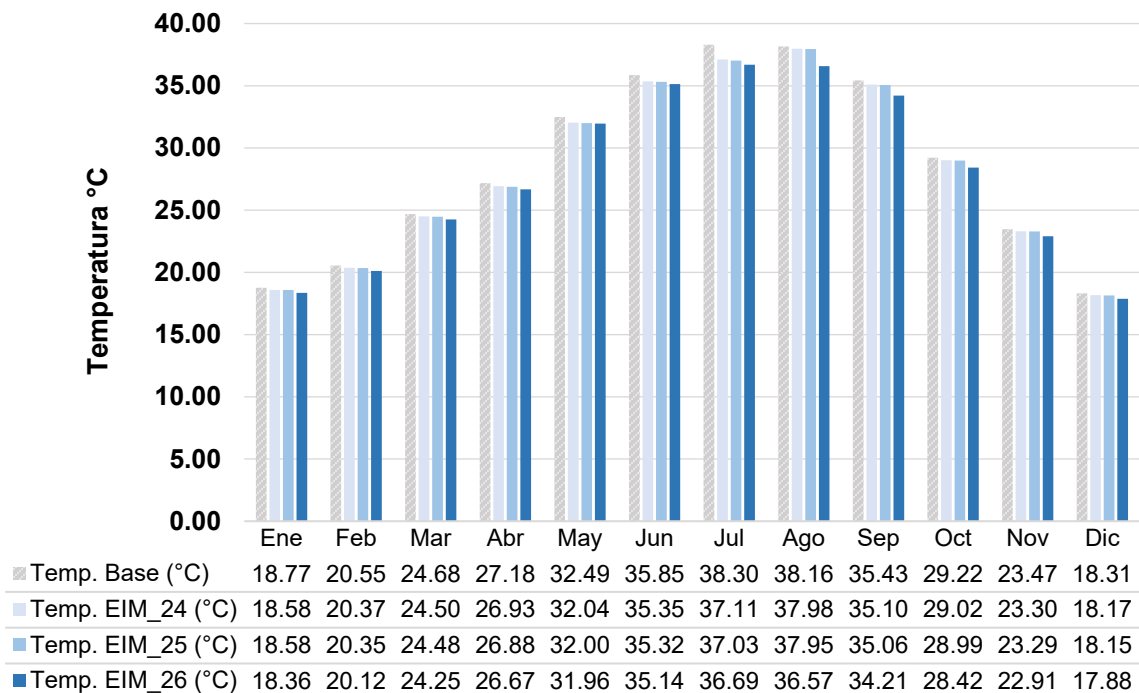
Tabla 59. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_24 – EIM_26.

Mes	ΔT EIM_24 (°C)	ΔT EIM_25 (°C)	ΔT EIM_26 (°C)
Mayo	0.45	0.49	0.53
Junio	0.50	0.53	0.70
Julio	1.19	1.27	1.61
Agosto	0.18	0.21	1.59
Septiembre	0.33	0.37	1.22

Nota: EIM_24: Apertura nocturna 40 %; EIM_25: Apertura nocturna 60 %; EIM_26: Apertura combinada 40 % (día + noche); elaboración propia (2025).

La Figura 48, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior bajo las distintas configuraciones de apertura evaluadas.

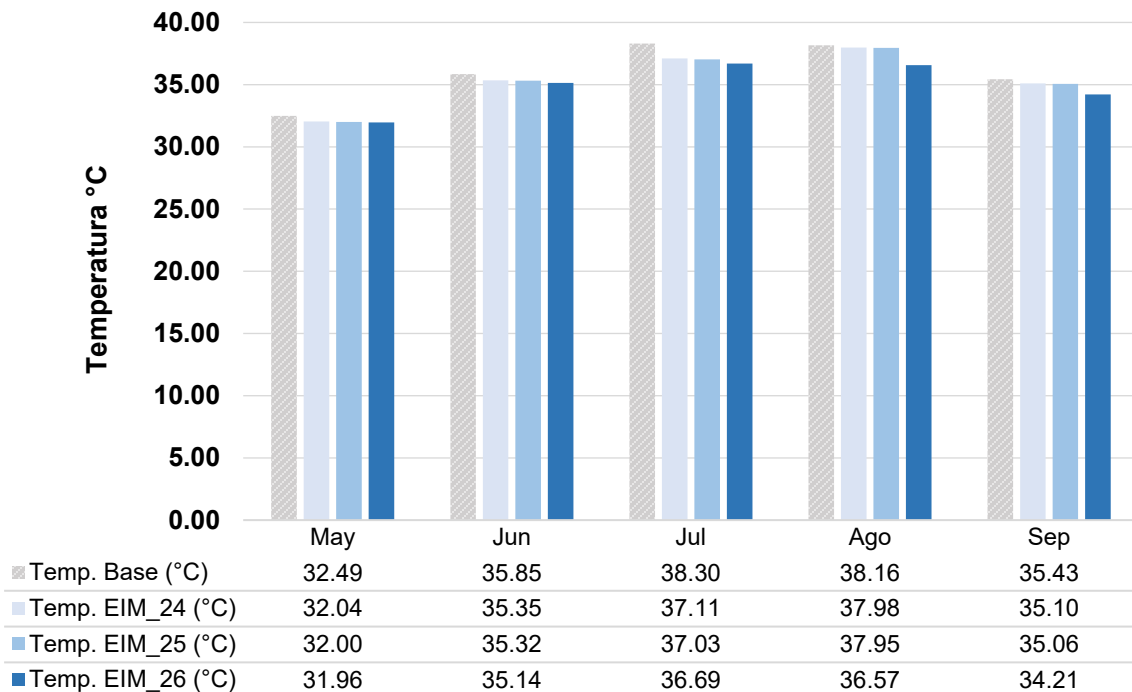
Figura 48. Temperatura operativa mensual: EIM_24–EIM_26 vs. escenario base.



Nota: EIM_24: Apertura nocturna 40 %; EIM_25: Apertura nocturna 60 %; EIM_26: Apertura combinada 40 % (día + noche); elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), la Figura 49, sintetiza la comparación específica de desempeño térmico de los tres escenarios respecto al modelo base.

Figura 49. Temperatura operativa mensual: EIM_24–EIM_26 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), los resultados evidencian un comportamiento térmico claramente diferenciado según la estrategia de apertura aplicada.

Los escenarios de apertura nocturna (EIM_24 y EIM_25), a pesar de contar con porcentajes de apertura crecientes (40 % y 60 %), mostraron reducciones térmicas irregulares y dependientes del mes, con descensos máximos de -1.19 °C y -1.27 °C en julio, respectivamente. En los meses adyacentes, la efectividad se redujo drásticamente ($< 0.5\text{ °C}$), reflejando la dependencia directa de esta estrategia respecto al gradiente térmico nocturno disponible.

En contraste, el escenario de apertura combinada (EIM_26) presentó el mejor desempeño del subgrupo, con reducciones sostenidas entre $-1.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-1.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante los meses críticos. La ventilación diurna permitió evacuar parte de la carga sensible acumulada por radiación directa durante las horas matutinas, mientras que la apertura nocturna facilitó la descarga térmica residual durante la noche, aprovechando los gradientes exteriores.

Este comportamiento se alinea con los postulados de Givoni (1994), Olgyay (1963) y Szokolay (2014), quienes destacan que la efectividad de la ventilación natural en climas cálido secos depende tanto del control oportuno de las cargas internas como del aprovechamiento secuencial de los gradientes térmicos día-noche para facilitar la descarga de calor acumulado.

Tabla 60. Síntesis comparativa de parámetros y resultados EIM_24 – EIM_26.

Indicador	EIM_24	EIM_25	EIM_26
Transmitancia solar aplicada	0.10	0.20	0.30
Horario de apertura	Nocturno	Nocturno	Combinado (día+noche)
Acrilamiento aplicado	20 % de transmitancia solar	20 % de transmitancia solar	20 % de transmitancia solar
Sombreado exterior	Sin sombra	Sin sombra	Sin sombra
Reducción térmica máxima ($^{\circ}\text{C}$)	1.19	1.27	1.61
Mes de mayor reducción	Julio	Julio	Julio
Aspecto térmico	Reducción intermedia	Reducción superior puntual	Reducción sostenida y superior
Paramento intervenido	Frente vertical de cubierta Este	Frente vertical de cubierta Este	Frente vertical de cubierta Este

Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.2 Ventilación pasiva sin acristalamiento

Este apartado presenta los resultados correspondientes a los escenarios que incorporan sistemas de disipación de calor mediante ventilación pasiva aplicada

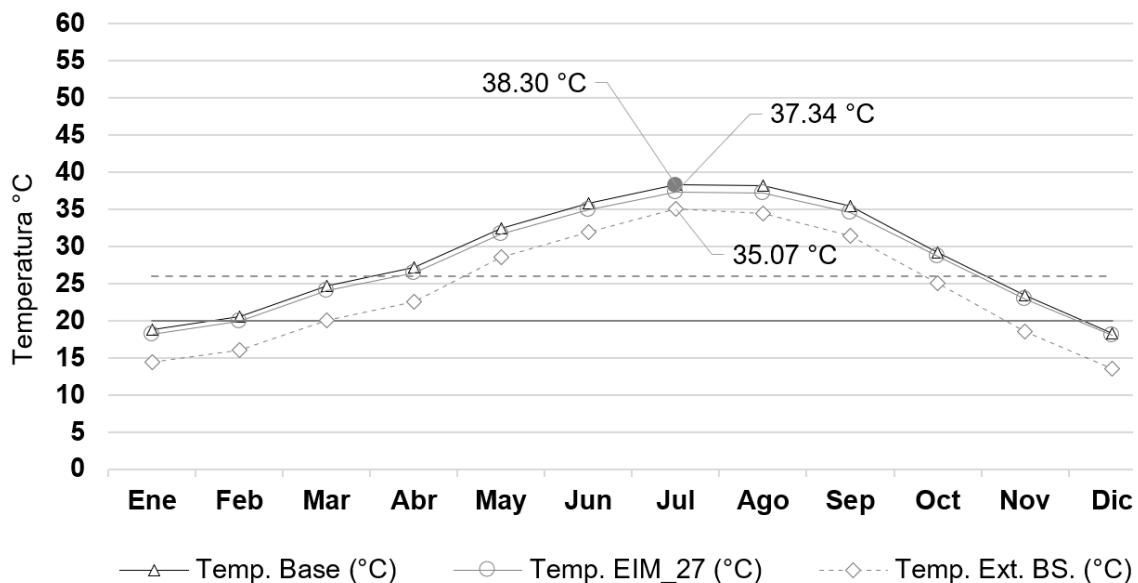
exclusivamente sobre superficies opacas de la envolvente. Las estrategias evaluadas incluyen: chimenea solar pasiva (EIM_27), extractores eólicos pasivos (EIM_28), rejillas de ventilación cruzada (EIM_29) y tragaluces ventilados (EIM_30). Las intervenciones se integraron al modelo base validado, manteniendo las condiciones geométricas, térmicas y operativas constantes, para documentar el comportamiento térmico comparativo de cada sistema bajo condiciones de clima cálido seco extremo.

4.1.3.2.1 Escenario EIM_27 – Chimenea solar pasiva

La implementación de una chimenea solar pasiva generó reducciones térmicas sostenidas durante el periodo crítico. En julio, la temperatura operativa interior descendió a 37.34 °C ($\Delta T = -0.96$ °C respecto al escenario base). Las reducciones se mantuvieron consistentes entre mayo y septiembre, con valores entre -0.86 °C y -0.94 °C. El promedio anual de reducción fue de -0.70 °C.

La figura 50, muestra una separación clara y progresiva respecto al escenario base, con reducciones sostenidas durante los meses cálidos.

Figura 50. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_27 vs. escenario base.



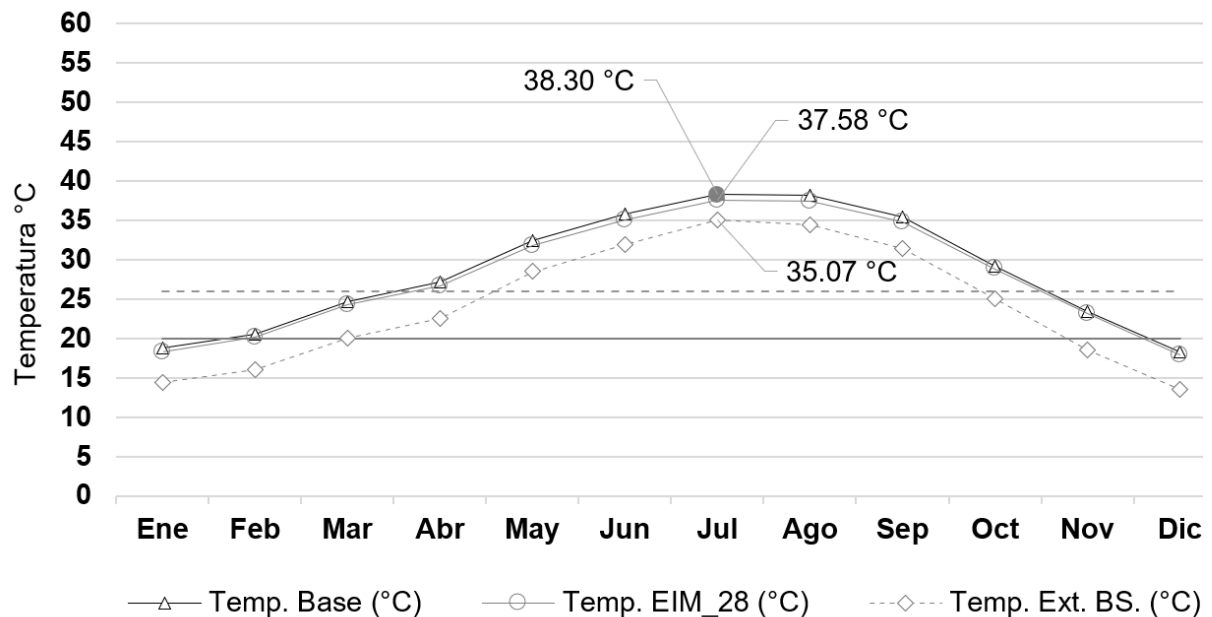
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.2.2 Escenario EIM_28 – Extractores eólicos pasivos

La instalación de extractores eólicos pasivos permitió obtener reducciones térmicas constantes durante los meses cálidos. En julio, la temperatura operativa alcanzó 37.58 °C ($\Delta T = -0.72$ °C). Los descensos oscilaron entre -0.69 °C y -0.73 °C durante el periodo crítico, con un promedio anual de reducción de -0.50 °C.

La figura 51, muestra una curva visiblemente por debajo del escenario base durante los meses más cálidos.

Figura 51. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_28 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

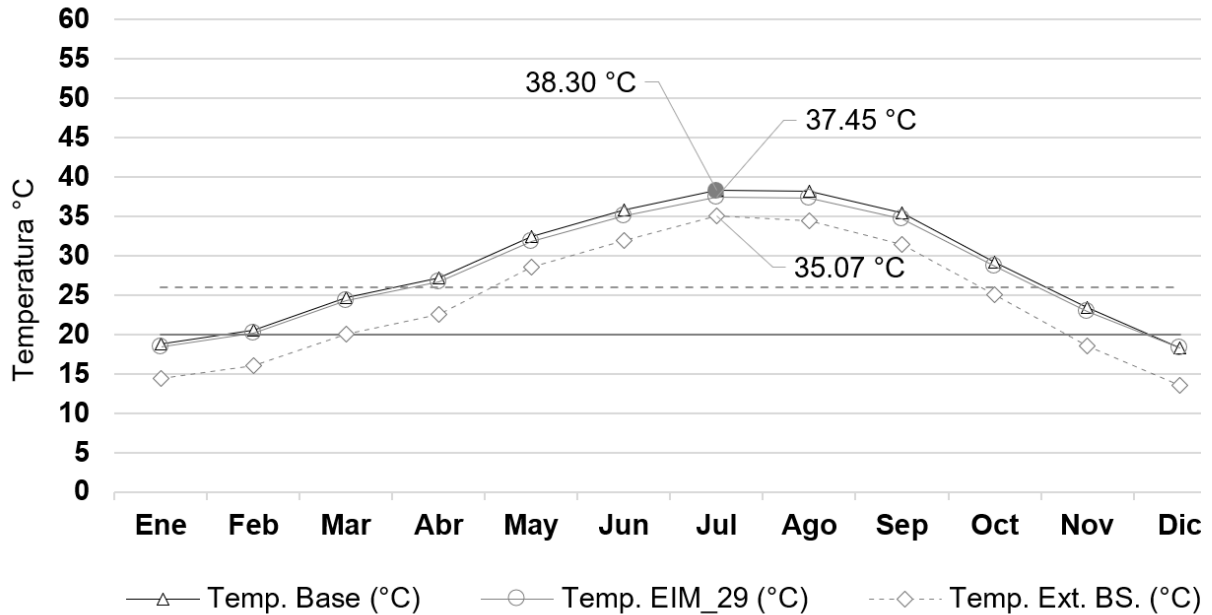
4.1.3.2.3 Escenario EIM_29 – Rejillas ventiladas (superior e inferior)

Las rejillas de ventilación cruzada mostraron un comportamiento térmico progresivo, con reducciones de hasta -0.85 °C en julio. El promedio de disminución

durante el periodo crítico fue de $-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el promedio anual se ubicó en $-0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 52, muestra una curva descendente respecto al escenario base durante los meses con mayor carga térmica.

Figura 52. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_29 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

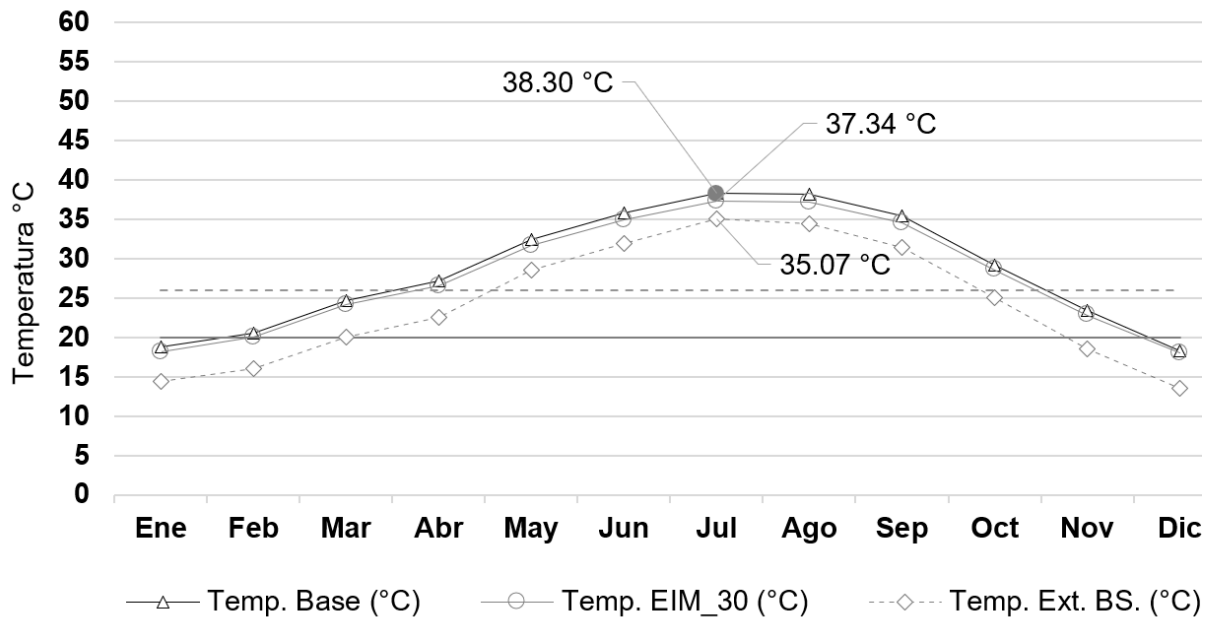
4.1.3.2.4 Escenario EIM_30 – Tragaluz ventilado

La estrategia de tragaluz ventilado alcanzó reducciones térmicas comparables a la chimenea solar. En julio, la temperatura operativa fue de $37.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = -0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las disminuciones durante el periodo de máxima carga térmica oscilaron entre $-0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.94\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un promedio anual de $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 53, muestra una curva de desempeño térmico cercana a la observada en EIM_30, aunque con ligeras diferencias en los meses intermedios.

Figura 53.

Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: EIM_30 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.3.2.5 Comparación global entre estrategias de ventilación pasiva sin acristalamiento

Esta sección integra el análisis comparativo de los escenarios EIM_27 a EIM_30, con el objetivo de establecer las diferencias de desempeño térmico derivadas de la incorporación de diversos dispositivos de disipación pasiva de calor mediante ventilación natural en la envolvente opaca del edificio de estudio.

Los resultados obtenidos durante el periodo crítico (mayo a septiembre) se sintetizan en la tabla 60, donde se aprecia que todos los dispositivos lograron reducciones térmicas frente al escenario base, aunque con eficiencias diferenciadas según el sistema aplicado.

Tabla 61. Reducción mensual de temperatura operativa respecto al escenario base EIM_27 – EIM_30.

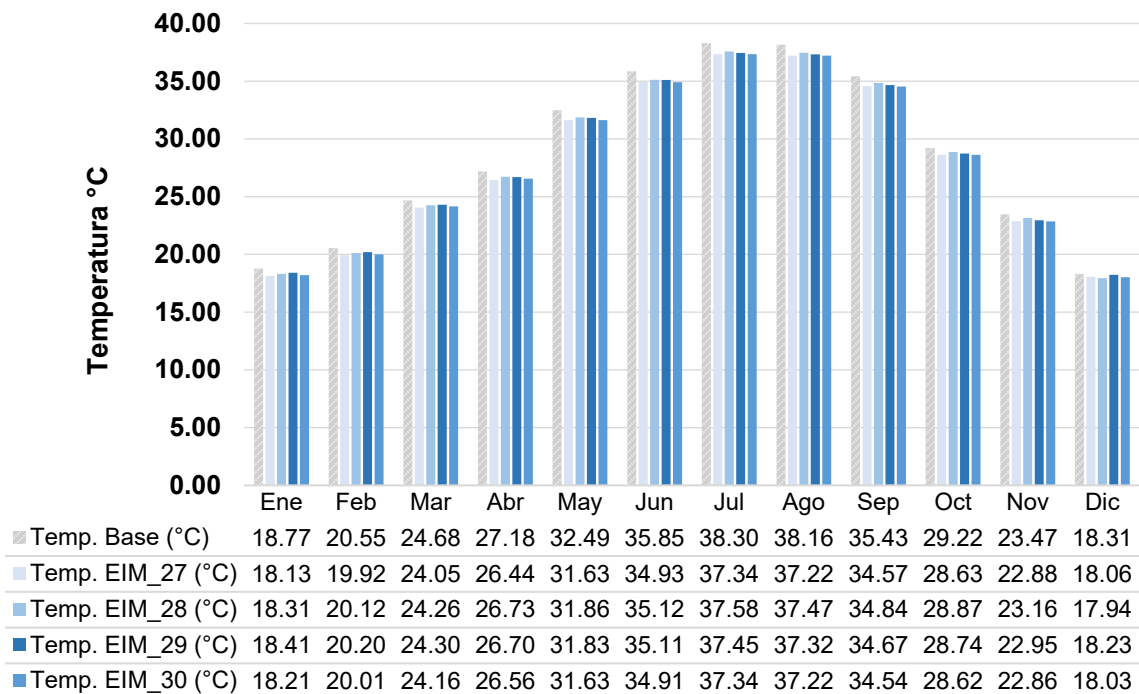
Mes	ΔT EIM_27 (°C)	ΔT EIM_28 (°C)	ΔT EIM_29 (°C)	ΔT EIM_30 (°C)
-----	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

Mayo	0.86	0.64	0.79	0.86
Junio	0.92	0.73	0.74	0.94
Julio	0.96	0.72	0.85	0.96
Agosto	0.94	0.69	0.84	0.94
Septiembre	0.86	0.63	0.66	0.88

Nota: EIM_27: Chimenea solar; EIM_28: Extractores eólicos; EIM_29: Rejillas ventiladas; EIM_30: Tragaluz ventilado; elaboración propia (2025).

La figura 54, presenta la evolución anual de la temperatura operativa interior registrada bajo cada una de las estrategias evaluadas. A lo largo del ciclo anual, los dispositivos mantuvieron reducciones térmicas sostenidas frente al escenario base, con desempeños más notables durante los meses cálidos, especialmente en los sistemas basados en convección térmica ascendente.

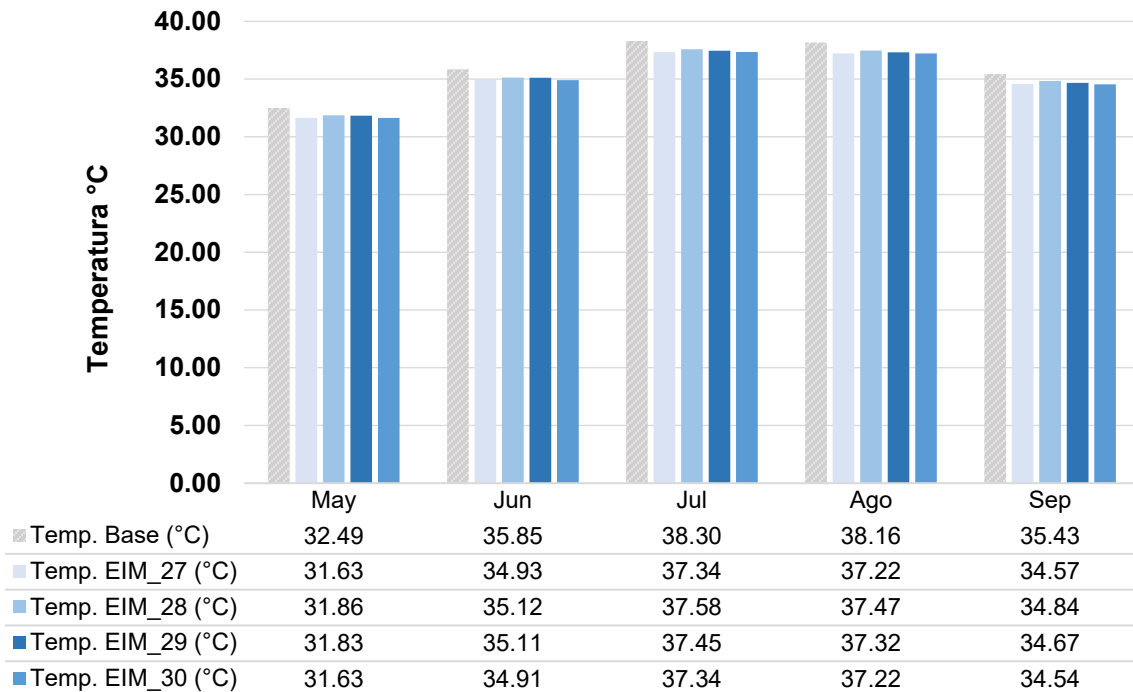
Figura 54. Evolución anual de temperatura operativa: EIM_27–EIM_30 vs. escenario base.



Nota: EIM_27: Chimenea solar; EIM_28: Extractores eólicos; EIM_29: Rejillas ventiladas; EIM_30: Tragaluz ventilado; elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), correspondiente a las condiciones de máxima carga térmica, se amplificaron las diferencias de desempeño entre los dispositivos, como sintetiza la figura 55. La magnitud de reducción térmica se concentró en el rango de $-0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ según el sistema implementado.

Figura 55. Temperatura operativa mensual: EIM_27–EIM_30 vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

Durante el periodo crítico (mayo-septiembre), los resultados de los escenarios EIM_27 a EIM_30 evidenciaron comportamientos térmicos diferenciados según el principio físico de extracción térmica empleado, permitiendo establecer un orden claro de efectividad entre las soluciones evaluadas.

El tragaluz ventilado (EIM_30) y la chimenea solar pasiva (EIM_27) presentaron los mejores desempeños térmicos del grupo, ambos con reducciones máximas equivalentes de $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio, y promedios sostenidos cercanos en todos los meses críticos ($\approx -0.90\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este comportamiento confirma la elevada eficiencia de los sistemas basados en gradiente térmico ascendente directo, donde el diferencial de

temperatura interior-exterior, sumado a la geometría vertical de los ductos, favorece un flujo continuo de extracción convectiva en periodos de máxima carga térmica.

En un segundo nivel de desempeño se ubicaron las rejillas ventiladas (EIM_29), con reducciones máximas de -0.85°C en julio. Aunque generan una convección natural cruzada, su eficiencia queda limitada por la menor diferencia de presión entre niveles y por su dependencia parcial del viento exterior para mantener el gradiente de flujo.

El desempeño más bajo correspondió a los extractores eólicos (EIM_28), con reducciones máximas de -0.72°C . Su capacidad de extracción está directamente condicionada por la velocidad y constancia del viento exterior, lo que en climas cálido-secos puede presentar importantes variaciones diurnas y estacionales, reduciendo su estabilidad de funcionamiento bajo condiciones térmicas críticas.

Este escalonamiento de resultados confirma que, en climas cálido-secos extremos, la eficiencia de los sistemas de disipación térmica pasiva se encuentra directamente correlacionada con el control del flujo ascendente por diferencial térmico interno más que por mecanismos dependientes de gradientes de presión externa, tal como lo han documentado Givoni (1994), Szokolay (2014) y Olgyay (1963).

4.5 Análisis comparativo integral entre escenarios individuales

La comparación transversal de los escenarios individuales permite interpretar no solo las magnitudes de reducción térmica alcanzadas, sino los mecanismos físicos dominantes que explican su eficacia diferencial frente al modelo base. La respuesta térmica observada en cada grupo estratégico está condicionada por tres variables fundamentales: el tipo de transferencia térmica controlada (radiativa, conductiva o convectiva), la posición geométrica de la intervención (horizontal o vertical), y el régimen horario dominante de carga térmica en el clima cálido-seco extremo.

4.5.1 Estrategias de protección solar y térmica

En el grupo de control solar, los mayores efectos se concentraron, como era previsible, en las estrategias de sombreado horizontal aplicado en cubierta (EIM_07 y EIM_08), donde las reducciones alcanzaron -1.33 °C y -1.98 °C , respectivamente. Este comportamiento confirma el dominio absoluto que ejerce la radiación directa sobre superficies horizontales expuestas en climas áridos, donde el ángulo de incidencia solar prácticamente maximiza su efecto durante todo el periodo crítico. La diferencia térmica incremental entre el 50 % y 75 % de cobertura ($\Delta T \approx 0.65\text{ °C}$) evidencia un comportamiento de respuesta no lineal frente al aumento de superficie sombreada, lo que sugiere un punto de inflexión de eficiencia marginal, coherente con lo planteado por Szokolay (2014) respecto a la saturación de protección en planos horizontales.

Por contraste, los sistemas de sombreado vertical (EIM_09 y EIM_10), aun actuando sobre paramentos expuestos (este y sur, respectivamente), mostraron un desempeño térmico sustancialmente menor, alcanzando -1.02 °C y -0.55 °C . Este comportamiento refleja la menor carga térmica acumulada en superficies verticales frente a la cubierta, así como la menor eficiencia horaria de las sombras proyectadas, donde la radiación incidente sobre el frente sur queda limitada a franjas horarias específicas.

En el subconjunto de acristalamientos (EIM_03 al EIM_06), el comportamiento térmico evidenció claramente el riesgo de incrementar las ganancias internas cuando no se acompaña de control solar pasivo. Las superficies acristaladas sin sombra (EIM_03 a EIM_05) llegaron a producir incrementos térmicos de hasta $+0.10\text{ °C}$, pese a la baja transmitancia considerada. Únicamente el EIM_06, al incorporar sombreado fijo, consiguió neutralizar parcialmente esta ganancia, estabilizando el comportamiento interior en niveles térmicamente neutros ($\Delta T \approx -0.12\text{ °C}$). Este patrón refleja la alta sensibilidad del componente vidriado en frentes expuestos a radiación solar de primera hora, fenómeno ampliamente documentado por Givoni (1994).

Finalmente, los dos recubrimientos superficiales en cubierta (EIM_01 y EIM_02) mostraron reducciones moderadas (-1.07 °C y -1.27 °C), claramente inferiores al

efecto de los dispositivos de sombra (EIM_07 y EIM_08). Aunque ambos tratamientos disminuyen la absorción solar superficial, su efecto queda acotado al control de ganancias indirectas por conducción descendente, sin evitar la incidencia directa, lo cual explica su desempeño intermedio dentro del bloque.

La Tabla 61, documenta la reducción o incremento térmico máximo mensual registrado en cada escenario, junto con el tipo de intervención aplicada y el elemento de la envolvente considerado.

Tabla 62. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_01 al EIM_10 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).

ID	Tipo de intervención	Elemento intervenido	ΔT máxima (°C)
EIM_01	Revestimiento reflectante blanco	Cubierta	-1.07
EIM_02	Revestimiento con cambio óptico	Cubierta	-1.27
EIM_03	Acristalamiento 10 %	Frente vertical de cubierta (Este)	+0.04
EIM_04	Acristalamiento 20 %	Frente vertical de cubierta (Este)	+0.07
EIM_05	Acristalamiento 30 %	Frente vertical de cubierta (Este)	+0.10
EIM_06	Acristalamiento 20 % con sombra	Frente vertical de cubierta (Este)	-0.12
EIM_07	Sombreado horizontal (50 %)	Cubierta	-1.33
EIM_08	Sombreado horizontal (75 %)	Cubierta	-1.98
EIM_09	Sombreado vertical	Frente vertical de cubierta (Este)	-1.02
EIM_10	Alero fijo	Muro sur	-0.55

Nota: Elaboración propia (2025).

4.5.2 Estrategias de amortiguamiento térmico

En el bloque de amortiguamiento térmico, los resultados muestran diferencias significativas directamente asociadas al material empleado, su espesor aplicado y la posición del aislamiento dentro de la envolvente.

En cubierta, donde la carga térmica es dominada por radiación directa y transmisión conductiva descendente, los materiales de menor conductividad presentaron el mejor desempeño. El poliuretano proyectado (EIM_12, 4") alcanzó la mayor reducción térmica del grupo ($-4.69\text{ }^{\circ}\text{C}$), seguido por la fibra de vidrio (EIM_13, 5") con $-4.46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ambos materiales comparten propiedades de baja conductividad térmica ($\approx 0.025\text{ W/m}\cdot\text{K}$ y $\approx 0.038\text{ W/m}\cdot\text{K}$, respectivamente), aunque el poliuretano supera en eficiencia volumétrica, requiriendo menor espesor para lograr estabilización térmica, tal como lo establecen Givoni (1994) y Olgay (1963) en sus principios de optimización de aislamiento en climas áridos.

El comportamiento de la celulosa (EIM_14, 4") se ubicó en un rango intermedio ($-4.13\text{ }^{\circ}\text{C}$), mostrando una respuesta térmica cercana a la de la fibra de vidrio, atribuible a su capacidad adicional de almacenamiento térmico intersticial, pero con ligera desventaja por su mayor densidad superficial y capacidad higroscópica, como lo plantea Szokolay (2014) para materiales de masa ligera moderada.

El poliestireno expandido (EIM_15, 1.5"), al disponer de un espesor considerablemente menor, redujo su efecto aislante a $-2.82\text{ }^{\circ}\text{C}$, pese a su buena conductividad ($\approx 0.035\text{ W/m}\cdot\text{K}$), dejando en evidencia la limitante de espesor como variable crítica bajo cargas intensas de radiación descendente.

El comportamiento del poliuretano con espesor reducido (EIM_11, 2") validó este mismo principio, alcanzando $-3.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultado intermedio entre los demás materiales y demostrando su elevada eficiencia en bajas secciones.

En muros perimetrales, donde el flujo térmico es más influenciado por las oscilaciones diurnas de radiación lateral, el EPS (EIM_17, 3") mostró el mejor comportamiento ($-2.19\text{ }^{\circ}\text{C}$), seguido por el EPS de 1" (EIM_16, $-1.52\text{ }^{\circ}\text{C}$), confirmando nuevamente la influencia directa del espesor y la baja conductividad sobre el flujo neto transmitido.

Por su parte, la celulosa en muros a 2" (EIM_18) mostró un efecto aislante bajo ($-0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que al incrementar su espesor a 4" (EIM_19), el sistema presentó un comportamiento inverso, con incremento sostenido de temperatura (hasta $+1.39\text{ }^{\circ}\text{C}$), resultado del sobredimensionamiento de la resistencia térmica superficial

sin mecanismos paralelos de disipación. Este fenómeno, como lo advierten Szokolay (2014) y Givoni (1994), responde a la inhibición de los intercambios nocturnos radiativos en paramentos verticales con baja vista efectiva al cielo, favoreciendo la acumulación progresiva de calor interior.

En su conjunto, los resultados validan que en climas cálido-secos el aislamiento térmico óptimo requiere no solo baja conductividad, sino un balance crítico de espesor adaptado a la posición geométrica del elemento intervenido, en coherencia con los postulados clásicos de diseño pasivo.

La tabla 62, documenta los resultados por escenario, especificando el tipo de intervención, el espesor del material aplicado, el componente arquitectónico tratado y la variación térmica mensual máxima registrada frente al escenario base.

Tabla 63. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_11 al EIM_19 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).

ID	Tipo de intervención	Elemento intervenido	ΔT máxima (°C)
EIM_11	Poliuretano proyectado 2"	Cubierta	-3.84
EIM_12	Poliuretano proyectado 4"	Cubierta	-4.69
EIM_13	Fibra de vidrio 5"	Cubierta	-4.46
EIM_14	Celulosa proyectada 4"	Cubierta	-4.13
EIM_15	Poliestireno expandido (EPS) 1.5"	Cubierta	-2.82
EIM_16	Poliestireno expandido (EPS) 1"	Muros	-1.52
EIM_17	Poliestireno expandido (EPS) 3"	Muros	-2.19
EIM_18	Celulosa proyectada 2"	Muros	-0.57
EIM_19	Celulosa proyectada 4"	Muros	+1.39
EIM_11	Poliuretano proyectado 2"	Cubierta	-3.84

Nota: Elaboración propia (2025).

4.5.3 Estrategias de disipación de calor

Durante el periodo crítico, los resultados obtenidos en el bloque de estrategias de disipación de calor reflejaron la complejidad inherente al comportamiento de los flujos de ventilación pasiva, tanto en configuraciones de apertura operable como en dispositivos de extracción térmica basados en gradientes físicos de presión y temperatura. En los escenarios de ventilación operable diurna (EIM_20 a EIM_23), la correlación entre el porcentaje de apertura y la magnitud de reducción térmica resultó progresiva, aunque con alcances limitados. Con aperturas del 10 % (EIM_20) y 20 % (EIM_21), las reducciones máximas registradas fueron discretas ($-0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente), evidenciando que, bajo tasas de intercambio reducidas, el volumen de aire renovado resulta insuficiente para evacuar el calor sensible acumulado en las primeras horas del día por incidencia solar directa sobre el paramento este.

Al incrementar los porcentajes de apertura al 40 % (EIM_22) y 60 % (EIM_23), las reducciones térmicas alcanzaron $-0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente, validando el principio físico documentado por Olgay (1963) y Givoni (1994), donde la eficiencia de la ventilación natural diurna en climas áridos depende estrechamente tanto del gradiente térmico exterior-interior como de la superficie efectiva de apertura habilitada durante las horas críticas de carga térmica.

En contraste, los escenarios de ventilación nocturna (EIM_24 y EIM_25) mostraron un comportamiento térmico más heterogéneo. Aunque durante julio se alcanzaron reducciones relevantes de $-1.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ (EIM_24, apertura 40 %) y $-1.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (EIM_25, apertura 60 %), durante agosto el efecto se redujo considerablemente, con descensos cercanos a $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta variabilidad evidencia la alta sensibilidad de la ventilación nocturna al comportamiento puntual del gradiente térmico nocturno, el cual puede debilitarse durante noches templadas de transición, limitando la efectividad de la descarga radiativa por enfriamiento indirecto, tal como lo advierten Givoni (1994) y Szokolay (2014) en climas cálido-secos.

El escenario combinado (EIM_26), que habilita el flujo ventilatorio continuo durante el día y la noche, mostró el mejor desempeño térmico del subgrupo de aperturas, alcanzando reducciones de hasta $-1.61\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento confirma

que la superposición de ventilación diurna y nocturna favorece un ciclo más estable de evacuación térmica, al permitir aprovechar gradientes positivos durante el día y negativos durante la noche de forma complementaria.

Por su parte, los escenarios aplicados sobre superficies opacas de cubierta (EIM_27 a EIM_30) lograron reducciones térmicas más estables y con menor dependencia de las variaciones instantáneas del gradiente térmico. La chimenea solar pasiva (EIM_27) obtuvo reducciones constantes de $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, confirmando su capacidad de inducir flujos ascendentes sostenidos mediante el aprovechamiento de la convección térmica controlada por geometría y orientación. Los extractores eólicos (EIM_28), con un descenso térmico máximo de $-0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$, mostraron un comportamiento estable condicionado por la velocidad del viento, manteniendo reducciones homogéneas en los meses de mayor carga térmica. Las rejillas ventiladas (EIM_29) alcanzaron una reducción de $-0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, validando el principio de ventilación cruzada natural mediante diferencia de presión y altura, con un patrón estable a lo largo del ciclo anual. Finalmente, el tragaluz ventilado (EIM_30) replicó el comportamiento de la chimenea solar, con reducciones de hasta $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, aportando simultáneamente ventilación pasiva por estratificación y aprovechamiento de iluminación natural.

De manera integral, estos resultados validan que, bajo condiciones de clima cálido seco extremo, los sistemas de disipación pasiva basados en diferencias de altura (chimeneas, rejillas verticales y tragaluces ventilados) ofrecen reducciones térmicas más sostenidas y estables, superando en consistencia a las estrategias puramente basadas en superficie de apertura operable.

La tabla 63, documenta los resultados por escenario, especificando el tipo de intervención, el componente arquitectónico tratado y la variación térmica mensual máxima registrada frente al escenario base.

Tabla 64. Comparación de temperatura operativa interior: escenarios EIM_20 al EIM_30 (ΔT máxima mensual respecto al escenario base).

ID	Tipo de intervención	Elemento intervenido	ΔT máxima (°C)
EIM_20	Apertura operable 10 % (diurna)	Frente vertical acristalado	-0.41
EIM_21	Apertura operable 20 % (diurna)	Frente vertical acristalado	-0.28
EIM_22	Apertura operable 40 % (diurna)	Frente vertical acristalado	-0.61
EIM_23	Apertura operable 60 % (diurna)	Frente vertical acristalado	-0.75
EIM_24	Apertura operable 40 % (nocturna)	Frente vertical acristalado	-1.19
EIM_25	Apertura operable 60 % (nocturna)	Frente vertical acristalado	-1.27
EIM_26	Apertura operable 40 % (combinada día/noche)	Frente vertical acristalado	-1.61
EIM_27	Chimenea solar pasiva	Cubierta	-0.96
EIM_28	Extractores eólicos pasivos	Cubierta	-0.72
EIM_29	Rejillas ventiladas	Frente vertical acristalado	-0.85
EIM_30	Tragaluces ventilados	Cubierta	-0.96

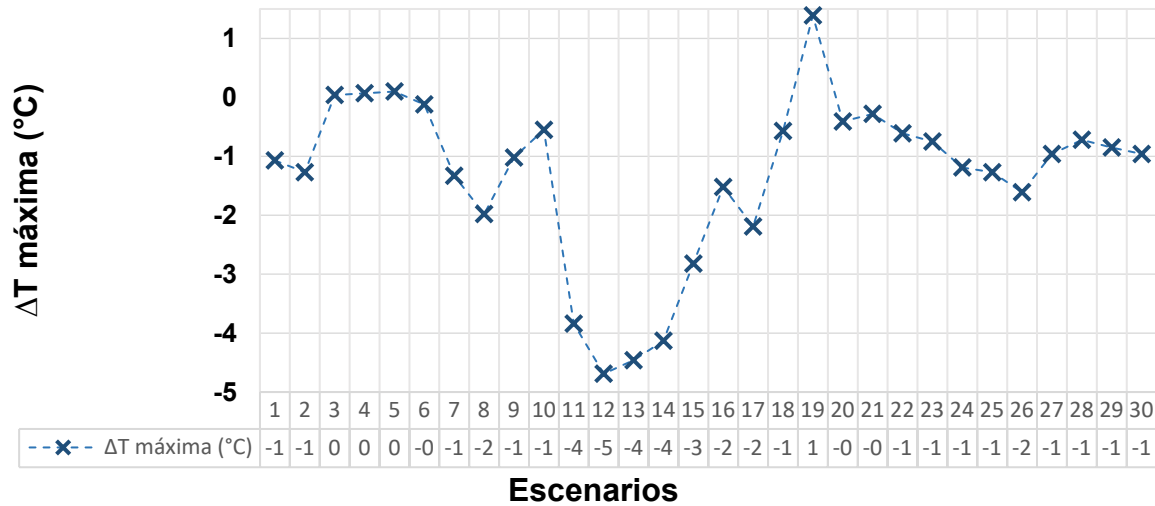
Nota: Elaboración propia (2025).

4.5.4 Comparación global de escenarios individuales

Con el propósito de sintetizar los resultados obtenidos en los treinta escenarios individuales (EIM_01 a EIM_30), se elaboró un gráfico comparativo que presenta de forma consolidada la reducción máxima mensual de temperatura operativa interior (ΔT máxima) registrada en cada caso respecto al escenario base. Este análisis global permite visualizar la magnitud de la variación térmica alcanzada por cada técnica de enfriamiento pasivo aplicada, considerando el conjunto de estrategias analizadas: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor.

El gráfico permite identificar con claridad la heterogeneidad de los efectos térmicos generados por las diferentes intervenciones, así como establecer patrones comparativos que serán considerados en la selección preliminar de escenarios integrales.

Figura 56. Comparación global de ΔT máxima mensual en los treinta escenarios individuales (EIM_01 a EIM_30).



4.6 Selección preliminar de escenarios integrales óptimos

Este apartado presenta la integración de los escenarios combinados más representativos derivados de las simulaciones realizadas. Los escenarios integrales fueron estructurados seleccionando las estrategias individuales con mejor desempeño térmico dentro de cada grupo estratégico. Su análisis permite identificar los efectos acumulativos y la interacción funcional de diversas estrategias pasivas aplicadas simultáneamente sobre el mismo volumen arquitectónico.

4.6.1 Escenarios combinados propuestos

La selección de combinaciones se realizó bajo criterios de máxima eficacia térmica, compatibilidad técnica y diferenciación de componentes arquitectónicos intervenidos, manteniendo las condiciones validadas de simulación. Se conformaron dos escenarios preliminares: Escenario Integral A y Escenario Integral B.

En el Escenario Integral A se integraron tres estrategias complementarias. El sombreado horizontal de cubierta al 75 % (EIM_08) actúa como barrera primaria a la ganancia solar directa. El aislamiento de poliuretano proyectado de 4" (EIM_12) proporciona alta resistencia térmica en la cubierta, minimizando el flujo de calor

conducido. Finalmente, la apertura operable combinada (día-noche) del 40 % en el frente vertical este (EIM_26) facilita la disipación continua del calor acumulado, particularmente efectiva en climas áridos con elevada oscilación térmica diaria.

Tabla 65. Escenario integral A – Estrategias pasivas con mayor reducción térmica.

ID	Estrategia aplicada	Elemento intervenido	Comportamiento térmico observado
EIM_08	Sombreado horizontal 75 %	Cubierta	Reducción térmica constante con ΔT máxima de $-1.98\text{ }^{\circ}\text{C}$
EIM_12	Poliuretano 4"	Cubierta	ΔT máxima de $-4.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ en mayo; efecto sostenido en meses cálidos
EIM_26	Apertura 40 % combinada + acristalamiento 20 %	Frente vertical este	Mayor disipación térmica entre mayo y agosto ($-1.61\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Nota: Elaboración propia (2025).

En el Escenario Integral B se combinaron: el sombreado horizontal del 50 % (EIM_07), el aislamiento mediante fibra de vidrio de 5" (EIM_13), y la chimenea solar pasiva (EIM_27) instalada en cubierta como mecanismo de extracción térmica vertical.

Tabla 66. Escenario integral B – Estrategias pasivas con mayor reducción térmica.

ID	Estrategia aplicada	Elemento intervenido	Comportamiento térmico observado
EIM_07	Sombreado horizontal 50 %	Cubierta	ΔT máx. de $-1.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio; reducción entre May y Sep.
EIM_13	Fibra de vidrio 5"	Cubierta	Reducción térmica superior a $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en periodo cálido
EIM_27	Chimenea solar pasiva	Cubierta	ΔT máxima de $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Julio; extracción pasiva estable

Nota: Elaboración propia (2025).

4.6.2 Resultados simulados de escenarios integrales propuestos

La definición de las combinaciones integrales partió de los escenarios individuales que demostraron las mayores reducciones térmicas dentro de cada grupo estratégico. Se establecieron dos escenarios preliminares, denominados Escenario Integral A y Escenario Integral B, los cuales representan configuraciones técnicamente compatibles, diferenciadas por el tipo y magnitud de las estrategias incorporadas.

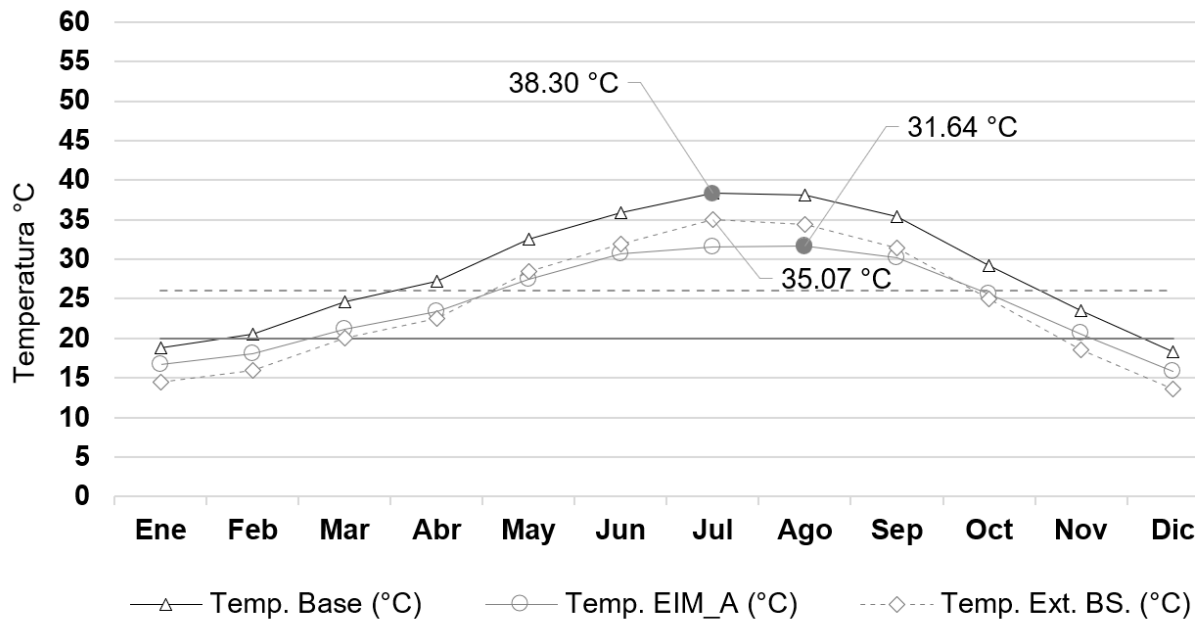
Escenario Integral A – Evaluación del desempeño térmico

Los resultados del Escenario Integral A evidencian el comportamiento térmico más eficiente del conjunto simulado, con reducciones térmicas máximas de $-6.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio y $-6.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ en agosto, periodos correspondientes a la máxima carga térmica estacional. Este desempeño sobresaliente se explica por la acción combinada de tres mecanismos sinérgicos: la alta reflectancia superficial aplicada mediante el sombreado horizontal de 75 % limita la ganancia directa; el aislamiento de poliuretano de 4" maximiza la resistencia térmica superficial, reduciendo la transmisión sensible; y la apertura combinada día-noche asegura la evacuación continua de calor acumulado, particularmente efectiva bajo las condiciones de alta oscilación térmica diurna y gradiente radiativo nocturno característicos del clima cálido seco extremo.

Durante el periodo extendido de mayo a septiembre, el Escenario Integral A logró un descenso promedio de $-5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto al escenario base, mientras que el promedio anual alcanzó los $-3.94\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos valores no solo superan ampliamente las reducciones observadas en los escenarios individuales, sino que validan el principio de superposición funcional de estrategias pasivas complementarias, tal como lo documentan Givoni (1994), Olgay (1963) y Szokolay (2014) para climas áridos con alta carga térmica solar.

La Figura 57, ilustra la evolución térmica mensual, destacando una separación clara y sostenida respecto al modelo base, con temperaturas operativas por debajo de los $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ incluso durante los meses críticos de carga térmica máxima.

Figura 57. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: Escenario Integral A vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

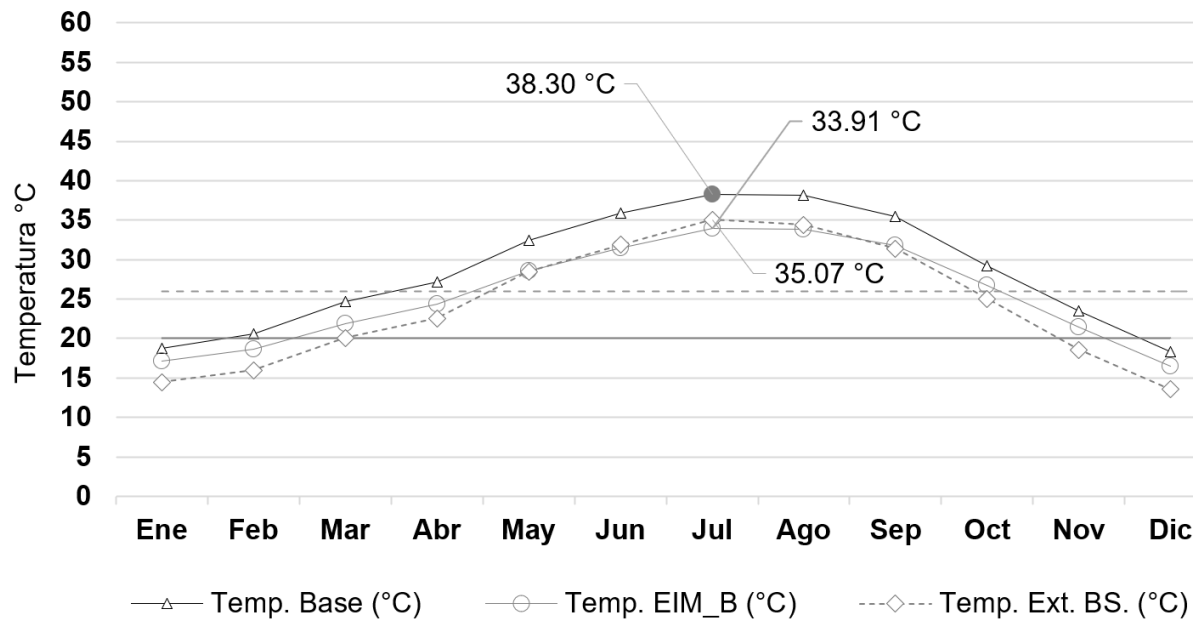
Escenario Integral B – Evaluación del desempeño térmico

En el caso del Escenario Integral B, la combinación de sombreado parcial (50 %), aislamiento de fibra de vidrio de 5” y la chimenea solar pasiva generó un desempeño térmico robusto, aunque de menor magnitud respecto al Escenario A. Las reducciones máximas alcanzaron $-4.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio y $-4.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ en agosto. Durante el periodo de máxima carga (mayo-septiembre), la reducción promedio fue de $-4.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el promedio anual alcanzó $-2.76\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aunque la fibra de vidrio ofrece una resistencia térmica elevada, su mayor espesor respecto al poliuretano incrementa el tiempo de respuesta térmica de la envolvente, lo que limita parcialmente su desempeño bajo fluctuaciones diarias rápidas. Adicionalmente, la chimenea solar pasiva, aun con una extracción continua, depende de la magnitud diaria del gradiente térmico vertical, el cual puede variar según las condiciones específicas de cada jornada climática. Estos factores explican la menor eficiencia térmica global respecto al Escenario A, donde la ventilación combinada mantiene un gradiente dinámico más uniforme durante todo el ciclo diario.

La Figura 58, muestra la evolución térmica mensual del Escenario Integral B frente al escenario base, donde se observa una reducción sostenida, pero con una amplitud de separación menor que la registrada en el Escenario A.

Figura 58. Comparación gráfica de temperatura operativa mensual: Escenario Integral B vs. escenario base.



Nota: Elaboración propia (2025).

La comparación técnica entre ambos escenarios evidencia que la combinación integrada del Escenario A no solo obtuvo la reducción térmica más alta registrada, sino que demostró mayor regularidad estacional. Su capacidad de reducir el pico térmico durante los meses críticos, sin generar sobre enfriamiento en los meses templados, confirma su robustez como alternativa integral de rehabilitación energética para climas áridos.

Por contraste, el Escenario B confirmó la validez de integrar dispositivos de extracción térmica como complemento funcional, aunque su eficiencia acumulada es inferior, debido a la dependencia de gradientes verticales variables y al retardo térmico de los sistemas aislantes utilizados. La lectura comparativa evidencia que, bajo climas cálido-

secos extremosos, la combinación simultánea de protección solar extensa, aislamiento de baja conductividad y ventilación operable continua proporciona el mayor beneficio térmico acumulado.

Ambas configuraciones validan la hipótesis general de esta investigación: las estrategias pasivas aplicadas de forma integrada permiten alcanzar reducciones térmicas cuantificables de alto impacto, con total independencia de sistemas electromecánicos activos.

4.7 Síntesis de hallazgos y conclusiones del capítulo

La evaluación comparativa de los escenarios simulados permitió identificar patrones de respuesta térmica diferenciados entre las estrategias pasivas analizadas, en función de su mecanismo de intervención, el elemento de la envolvente tratado y la condición climática específica del caso de estudio.

En las estrategias de protección solar y térmica, se confirmó que las intervenciones aplicadas sobre la cubierta presentaron el mayor impacto térmico, lo cual refleja la alta exposición de este componente a la radiación solar directa en climas cálido-secos extremosos. Los dispositivos de sombreado horizontal mostraron superioridad respecto a los recubrimientos reflectantes, validando la mayor eficacia de las barreras externas que interrumpen la ganancia térmica antes del ingreso a la envolvente.

Las intervenciones sobre frentes verticales acristalados demostraron, en cambio, comportamientos más sensibles a la relación entre transmitancia solar y capacidad de control solar pasivo, destacando la vulnerabilidad térmica de las superficies transparentes sin sombreado.

Dentro del grupo de amortiguamiento térmico, se observaron contrastes significativos entre los aislamientos aplicados en cubierta y en muros. La incorporación de materiales de baja conductividad térmica en cubierta, como el poliuretano o la fibra de vidrio, permitió estabilizar la temperatura operativa interior incluso bajo las cargas térmicas más elevadas.

En contraste, los aislamientos aplicados en muros mostraron comportamientos heterogéneos; mientras el EPS evidenció una mejora progresiva con el aumento de espesor, la celulosa proyectada en espesores altos produjo fenómenos de acumulación térmica, asociados a la limitada capacidad de disipación nocturna de los paramentos verticales en geometría industrial ligera.

Respecto a las estrategias de disipación de calor, el análisis de los mecanismos de ventilación pasiva mostró una alta sensibilidad al horario de operación y al volumen de apertura. Las aperturas diurnas alcanzaron reducciones modestas, limitadas por el gradiente térmico horario y la capacidad de renovación de aire. Las aperturas nocturnas evidenciaron mejoras puntuales, pero con baja estabilidad mensual, reflejando la variabilidad del gradiente nocturno en el clima local. Las configuraciones combinadas, en cambio, mostraron un comportamiento claramente superior al sumar los beneficios de ambos flujos térmicos.

En el caso de los dispositivos estructurales de extracción térmica (chimenea solar, rejillas, tragaluces ventilados y extractores eólicos), el patrón fue más estable, validando el principio físico de disipación por desplazamiento vertical de aire caliente bajo gradiente de presión y altura, especialmente efectivo en volúmenes industriales con baja compartimentación interior.

Finalmente, la formulación de los escenarios integrales permitió comprobar que la combinación estratégica de mecanismos de protección solar, aislamiento térmico eficiente y disipación activa mediante flujos ascendentes o aperturas controladas puede generar reducciones térmicas acumulativas superiores a las alcanzadas por cualquier intervención aislada. Este comportamiento evidencia la posibilidad de optimización térmica mediante diseño pasivo integrado, adaptado a las condiciones específicas de radiación y gradiente térmico propias de los climas cálido-secos extremos.

Los hallazgos documentados en este capítulo validan tanto el enfoque metodológico adoptado como la coherencia física de los resultados obtenidos, aportando evidencia empírica que sustenta la selección de combinaciones óptimas desarrollada en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Este capítulo presenta las conclusiones finales derivadas del análisis comparativo de estrategias de enfriamiento pasivo aplicadas sobre un edificio industrial representativo en clima cálido seco extremoso. Los resultados obtenidos permiten verificar el cumplimiento de los objetivos de investigación, validar la hipótesis planteada, sintetizar los hallazgos técnicos alcanzados, establecer aportaciones metodológicas específicas y proponer líneas futuras de investigación, en concordancia con los principios de eficiencia energética y acción climática.

5.1 Confirmación del cumplimiento de objetivos

El desarrollo de la investigación permitió alcanzar de manera íntegra los objetivos planteados. El análisis climático caracterizó los periodos críticos de carga térmica de Mexicali, estableciendo las bases bioclimáticas para la selección de estrategias pasivas pertinentes. La selección y caracterización del edificio industrial representativo respondió a criterios funcionales, geométricos y constructivos propios de la edificación industrial ligera en clima cálido seco extremoso.

El modelo digital fue construido, calibrado y validado mediante registros instrumentales obtenidos in situ, garantizando la fiabilidad de las simulaciones comparativas desarrolladas. La estructura metodológica permitió configurar treinta escenarios individuales agrupados en tres bloques estratégicos: protección solar y térmica, amortiguamiento térmico y disipación de calor.

El análisis comparativo cuantificó los efectos térmicos de cada intervención bajo control completo de variables externas, identificando reducciones térmicas específicas por técnica, material y configuración de intervención. La integración de escenarios permitió desarrollar dos configuraciones combinadas optimizadas, aplicables a procesos de rehabilitación energética industrial en climas áridos.

5.2 Validación de la hipótesis

Los resultados obtenidos validan la hipótesis planteada. La aplicación de técnicas de enfriamiento pasivo sobre la envolvente permitió disminuir de forma sustancial la temperatura operativa interior, alcanzando reducciones térmicas máximas acumuladas de 6.76 °C en configuraciones integrales.

En el bloque de protección solar, el sombreado horizontal del 75 % redujo la ganancia térmica directa en cubierta. Los aislamientos térmicos en cubierta, particularmente el poliuretano de 0.1016 m (4") y la fibra de vidrio de 0.127 m (5"), mostraron los mayores descensos térmicos individuales sin afectar la estabilidad térmica en los meses fríos, 4.69 °C y 4.46 °C, respectivamente. En las estrategias de disipación de calor, los dispositivos de apertura combinada día-noche (1.61 °C) y los sistemas de extracción vertical (chimenea solar y tragaluz ventilado, ambos 0.96 °C) mantuvieron descensos térmicos estables.

Aunque no se cuantificaron los ahorros energéticos directos, la reducción sistemática de la temperatura operativa interior implica una disminución potencial de la carga térmica interna y, por extensión, de la demanda energética de sistemas HVAC.

5.3 Conclusiones generales

- Las intervenciones pasivas en cubierta son más eficaces térmicamente que aquellas aplicadas en muros o frentes verticales, por su capacidad de interceptar la radiación solar directa en climas cálido secos extremos.
- Los materiales de aislamiento térmico de baja conductividad y espesores adecuados ofrecieron los mejores resultados individuales, destacando el poliuretano de 0.1016 m (4") y la fibra de vidrio de 0.127 m (5") con reducciones superiores a 4 °C.
- El sombreado horizontal del 75 % mostró efectos significativos de estabilización térmica interior durante el periodo de máxima carga térmica.

- Las estrategias de ventilación natural controlada mediante apertura combinada día-noche presentaron mejor desempeño que los modos exclusivamente diurnos o nocturnos.
- Los escenarios integrales A y B consolidaron la interacción compatible de estrategias pasivas, alcanzando reducciones máximas acumuladas de 6.76 °C y 4.39 °C respectivamente.
- La integración técnica de estrategias pasivas permite lograr rehabilitación térmica eficiente sin requerir modificaciones estructurales profundas ni depender de tecnologías electromecánicas activas.

5.4 Aportaciones técnicas de la investigación

- Se establece un marco metodológico riguroso y replicable que integra diagnóstico climático, validación empírica del modelo digital, desarrollo comparativo de escenarios pasivos y cuantificación de reducciones térmicas mensuales.
- Se identifican umbrales de eficacia térmica por técnica aplicada: aperturas inferiores al 20 % en ventilación diurna son ineficientes, y la celulosa de 0.1016 m (4") aplicada en muros puede inducir acumulación térmica negativa.
- Se proponen configuraciones integrales compatibles de intervención pasiva, con reducciones térmicas acumuladas verificadas superiores a 6 °C.
- Se ofrece una clasificación comparativa de estrategias pasivas según su eficiencia térmica, componente arquitectónico aplicado y comportamiento estacional, generando una herramienta técnica útil para su aplicación profesional.

5.5 Líneas de investigación futura

- Evaluar el confort térmico adaptativo con participación directa de usuarios industriales.
- Modelar cuantitativamente los ahorros energéticos derivados de las reducciones térmicas simuladas mediante la integración de sistemas HVAC en las simulaciones.
- Ampliar el análisis a edificaciones industriales con morfologías arquitectónicas no convencionales, evaluando la adaptabilidad de las estrategias pasivas desarrolladas.

5.6 Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los resultados obtenidos se alinean con los principios de energía asequible y no contaminante al reducir la demanda térmica sin recurrir a sistemas activos, y contribuyen a la acción por el clima al incorporar soluciones arquitectónicas de resiliencia térmica frente al calentamiento extremo. La metodología propuesta resulta replicable para edificaciones industriales de características equivalentes en regiones áridas.

REFERENCIAS

- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2022). Informe de actividades 2022. <https://www.gob.mx/conuee/documentos/informe-de-actividades-2022>
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2022). 2022 global status report for buildings and construction. United Nations Environment Programme. <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- International Energy Agency. (2021). The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- International Energy Agency. (2023). World energy outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- United Nations Environment Programme. (2023). 2023 global status report for buildings and construction. <https://www.unep.org/resources/publication/2023-global-status-report-buildings-and-construction>
- American Council for an Energy-Efficient Economy. (2023). Empowering electrification through building envelope improvements. <https://www.aceee.org/research-report/b2202>
- American Council for an Energy-Efficient Economy. (2024). How to decarbonize industrial process heat while building American manufacturing competitiveness. <https://www.aceee.org/research-report/i2401>
- American Solar Energy Society. (2022). Estimating the jobs impacts of tackling climate change. https://www.ases.org/wp-content/uploads/2022/12/ASES_TCCJobs_Summary.pdf
- Asociación Mexicana de Energía. (2023). Informe sobre la optimización del uso de energía en edificios industriales.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2022). Guía de eficiencia energética en edificaciones para climas cálidos secos. <https://www.gob.mx/conuee/documentos/guia-de-eficiencia-energetica-en-edificaciones-para-climas-calidos-y-secos>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). Informe de actividades 2022. <https://www.inegi.org.mx/informes/actividades/2022>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Sixth assessment report: Working group III report on the mitigation of climate change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3>

International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018 - Energy management systems. <https://www.iso.org/standard/69426.html>

National Institute of Standards and Technology. (2023). Integrated strategies for energy efficiency in industrial buildings in hot dry climates.

World Green Building Council. (2022). Climate change resilience in the built environment. <https://www.worldgbc.org/news-media/climate-change-resilience-built-environment>

World Green Building Council. (2022). Global policy principles for a sustainable built environment. <https://www.worldgbc.org/global-policy-principles>

Givoni, B. (1976). Man, climate, and architecture (2^a ed.). Elsevier. ISBN: 0853341087.

Liu, Y., Zhang, J., Zhao, Q., & Li, H. (2023). A review of building energy retrofit measures, passive design strategies and building regulation for low carbon development. *Energies*, 16(10), 4115. <https://doi.org/10.3390/en16104115>

Passive Buildings: A State-of-the-Art Review. (2023). *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 5(2). <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00055-0>

- Van der Ryn, S., & Cowan, S. (1996). *Ecological design*. Island Press. ISBN: 978-1559633895.
- Yeang, K. (1994). *Bioclimatic skyscrapers*. Academy Editions. ISBN: 978-1874056560.
- Hu, W. (2018). Creating sustainable industrial building in China by lowering energy use and improving the working environment. *Energy and Buildings*, 174, 36-48.
- Yew, M. K., Saw, L. H., Ng, T. C., Chian, M. C., Yit, S. W., & Lam, Y. W. (2018). The role of roof ventilation in mitigating roof heat transfer in hot humid climate: A review. *Journal of Building Engineering*, 19, 208–222. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.001>
- Kuhnhenne, M., & Pyschny, D. (2019). Neuartige Kassettenprofile zur Verbesserung der Energieeffizienz im Industrie- und Gewerbebau. *Bauphysik*, 41(3), 148-154.
- Slavković, B. (2019). Influence of glazing type on energy efficiency of industrial buildings in the process of revitalization – A case study. *Energy Efficiency*, 12(7), 1681-1693.
- Espino-Reyes, C. A., Ortega-Avila, N., & Rodriguez-Muñoz, N. A. (2020). Energy savings on an industrial building in different climate zones: Envelope analysis and PV system implementation. *Sustainability*, 12(3), 1391.
- Katona, Á. L., Xuan, H., Elhadad, S., Kistelegdi, I., & Háber, I. (2020). High-resolution CFD and in-situ monitoring based validation of an industrial passive air conduction system (PACS). *Energies*, 13(12), 3157.
- Vytchikov, Y. S., Saparyov, M. E., & Kostuganov, A. B. (2020). Optimization of structural solutions for building envelopes of industrial buildings operated in variable thermal conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 775, 012123.

- Li, Z., Zhang, Z., Cheng, Y., & Qiao, C. (2020). Simulation and analysis of energy consumption in the use of industrial building wall panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 474(5), 052003.
- Dervishi, S., & Karamani, S. (2020). Exploring the energy performance of an existing industrial building. *E3S Web of Conferences*, 181, 03004.
- Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mauro, G. M., Napolitano, D. F., Ruggiano, A., & Viscido, L. (2020). A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit. *Journal of Building Engineering*, 29, 101186.
- Androsics, T., & Baranyai, B. (2020). Optimized room arrangement and building shaping of an industrial and office facility. *Applied Energy*, 277, 115481.
- Ahmed, T., Fung, A. S., & Kumar, R. (2020). Energy benchmarking and ventilation related energy saving potentials for SMEs in Greater Toronto Area. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118961.
- Harmen, Y., Chhiti, Y., Alaoui, F. M., Bentiss, F., Deshayes, L., & Bensitel, M. (2020). Storage efficiency of paraffin-LDPE-MWCNT phase change material for industrial building applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10287-10296.
- Othman, A. A., Abdin, A. R., Amin, A. A., & Mahmoud, A. H. (2020). A bioclimatic design approach for the urban open space design at business parks. *Journal of Engineering and Applied Science*, 67(8), 1883-1901.
- Karpov, D., Dyudina, O., & Pavlov, M. (2021). A review on modern heat-insulating materials for improving the energy efficiency of buildings and life-support utilities. *Applied Thermal Engineering*, 182, 115871.
- Marinelli, S., Gamberini, R., Rimini, B., & Nesi, F. (2021). Implementing the nearly zero-energy buildings notion in industrial facilities. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 9(3), 1-17.

- Boobalakrishnan, P., Kumar, P. M., Balaji, G., Jenaris, D. S., Kaarthik, S., & Babu, M. J. (2021). Thermal management of metal roof building using phase change material (PCM). *Renewable Energy and Sustainable Development*, 12(2), 54-63.
- Catalbas, M. C., Kocak, B., & Yenipinar, B. (2021). Analysis of photovoltaic-green roofs in OSTIM industrial zone. *Sustainability*, 13(4), 935-947.
- Tian, G., Fan, Y., Wang, H., Zheng, H., Gao, M., Liu, J., & Liu, C. (2021). Studies on the thermal optical properties and solar heat gain of thin membrane structure industrial building. *Journal of Building Physics*, 44(3), 285-303.
- Mano, C., & Thongtha, A. (2021). Enhanced thermal performance of roofing materials by integrating phase change materials to reduce energy consumption in buildings. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(6), 065701.
- Cheela, V. R. S., John, M., Biswas, W., & Sarker, P. (2021). Combating urban heat island effect—A review of reflective pavements and tree shading strategies. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103225.
- Back, Y., Bach, P. M., Jasper-Tönnies, A., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2021). A rapid fine-scale approach to modelling urban bioclimatic conditions. *Science of the Total Environment*, 756, 143732.
- Peraldo-Ramos, A., Alvarez, N. R., Terán-Castañeda, A., & Uchuya-López, J. (2022). Numeric simulation study of a textile processing plant for residual energy recovery. *Journal of Energy Storage*, 47, 103688.
- Crespo Sánchez, E., & Masip Vilà, D. (2022). Thermochromic materials as passive roof technology: Their impact on building energy performance. *Energies*, 15(6), 2161. <https://doi.org/10.3390/en15062161>
- Cao, J., Zheng, L., Peng, J., Luo, Y., Hu, M., Wang, Q., & Pei, G. (2022). Preliminary characterization of a dual-source passive building cooling system based on loop thermosyphon. *Energy and Buildings*, 260, 111969.

- Satola, D., Wiberg, A. H., Singh, M., Babu, S., James, B., Dixit, M., Grynberg, Y., & Gustavsen, A. (2022). Comparative review of international approaches to net-zero buildings: Knowledge-sharing initiative to develop design strategies for greenhouse gas emissions reduction. *Sustainability*, 14(1), 102-121.
- Zhukov, A., Stepina, I., & Bazhenova, S. (2022). Ensuring the durability of buildings through the use of insulation systems based on polyethylene foam. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(5), 135-145.
- Rinawa, M. L., Pitchandi, P., Vigneshkumar, N., Sharma, R., Singh, M. K., Subbiah, R., & Kumar, P. M. (2022). Experimental analysis of the metal roofed industrial building using nano-silica disbanded crude wax (NDCW). *Materials Today: Proceedings*, 62(Part 4), 1746–1751. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.253>
- Kaushik, N., Saravanakumar, P., Dhanasekhar, S., & Saminathan, R. (2022). Thermal analysis of a double-glazing window using a nano-disbanded phase-changing material (NDPCM). *Energy and Buildings*, 258, 111924.
- Ghanemi, F., Zemmouri, N., & Ahriz, A. (2022). A study of the vegetal effect on the thermal comfort of outdoor area in hot regions. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103492.
- Ciacci, C., Di Naso, V., Banti, N., & Bazzocchi, F. (2023). Improvement of thermal performance and indoor comfort through green wall retrofit systems in existing industrial buildings. *Buildings*, 13(2), 369. <https://doi.org/10.3390/buildings13020369>
- Bach, A. J. E., Palutikof, J. P., Tonmoy, F. N., Smallcombe, J. W., Rutherford, S., Joarder, A. R., & Hossain, M. (2023). Retrofitting passive cooling strategies to combat heat stress in the face of climate change: A case study of a ready-made garment factory in Dhaka, Bangladesh. *Energy and Buildings*, 275, 112345.
- Lee, J. Y., & Chen, P. Y. (2023). Optimization of heat recovery networks for energy savings in industrial processes. *Energy and Buildings*, 276, 112346.

- Liu, Y., Luo, Z., & Grimmond, S. (2023). Impact of building envelope design parameters on diurnal building anthropogenic heat emission. *Journal of Building Engineering*, 278, 112347.
- Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. John Wiley & Sons.
- Perez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Lovins, A. B. (1977). *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*. Penguin.
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y. (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139>
- Harvey, L. D. D. (2013). *Energy and the New Reality 1: Energy Efficiency and the Demand for Energy Services*. Earthscan.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Wiley.
- Olgay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.
- Santamouris, M. (2019). *Cooling the cities: A countermeasure to urban heat islands*. Springer.
- Yeang, K. (1999). *The green skyscraper: The basis for designing sustainable intensive buildings*. Prestel Publishing.
- Bhamare, D., Rathod, M., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1926-1943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.011>

- Katona, Á. L. (2022). Integration of the passive air conduction systems' aerodynamic design into industrial buildings (Tesis doctoral). Breuer Marcel Doctoral School of Architecture, University of Pécs, Faculty of Engineering and Information Technology. Disponible en: <https://pea.lib.pte.hu/items/9ce755d2-22b1-47ffb6db-337747c83a9e>
- ASHRAE. (2019). HVAC Systems and Equipment Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Chua, K. J., & Chou, S. K. (2010). Energy performance of HVAC systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 919-928.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300.
- Harvey, L. D. D. (2013). *Energy and the New Reality 1: Energy Efficiency and the Demand for Energy Services*. Earthscan.
- Cabeza, L. F., Chàfer, M., & Palomo, E. (2010). *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design*. Springer.
- Aelenei, D., & Gonçalves, H. (2014). "From solar building design to net zero energy buildings: Performance insights of an office building." *Energy Procedia*, 48, 1236-1243.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). "A review on buildings energy consumption information." *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.001>
- Mills, E. (2011). "Building retrofits for increased energy efficiency: An international review." *Annual Review of Environment and Resources*, 36, 441-481. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042110-101913>

- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). "Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art." *Energy and Buildings*, 55, 889-902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). "Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization." *Energy and Buildings*, 144, 303-319. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.074>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2018). "Circular economy for the built environment: A research framework." *Journal of Cleaner Production*, 195, 1185-1195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.271>
- Rasmussen, J., Jensen, R. L., & Olesen, B. W. (2011). "Retrofit solutions for energy efficiency of buildings: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1244-1259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.091>
- Aste, N., Angelotti, A., & Buzzetti, M. (2009). "The influence of the external wall thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings." *Energy and Buildings*, 41(11), 1181-1187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>
- Korytarova, K., & Ürge-Vorsatz, D. (2017). "Energy savings potential in retrofit of building envelopes: A case study on European Union countries." *Energy and Buildings*, 152, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.046>
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). "Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art." *Energy and Buildings*, 55, 889-902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). "Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization." *Energy and Buildings*, 144, 303-319. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.074>

- Rasmussen, J., Jensen, R. L., & Olesen, B. W. (2011). "Retrofit solutions for energy efficiency of buildings: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1244-1259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.091>
- Korytarova, K., & Ürge-Vorsatz, D. (2017). "Energy savings potential in retrofit of building envelopes: A case study on European Union countries." *Energy and Buildings*, 152, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.046>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Bahadori, M. N. (1978). Passive cooling systems in Iranian architecture. *Scientific American*, 238(2), 144-154.
- Baker, N., & Steemers, K. (2000). *Energy and environment in architecture: A technical design guide*. Taylor & Francis.
- Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., & Xiao, Q. (1994). *Benefits of trees in urban areas*. USDA Forest Service.
- Straube, J., & Burnett, E. (2005). *Building science for building enclosures*. Building Science Press.
- Walker, A., & Wilson, D. (1998). *Ventilation: Design considerations for energy-efficient buildings*. McGraw-Hill.
- Yannas, S. (1994). *Solar energy and housing design: Principles, objectives, guidelines*. The Architectural Press.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2019). ASHRAE Standard 90.1-2019: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.

International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 50001:2018: Energy Management Systems — Requirements with Guidance for Use.

European Union. (2018). Directive (EU) 2018/844: Energy Performance of Buildings Directive (EPBD).

Secretaría de Energía (SENER). (2014). Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE).