

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

***Adecuación ambiental multiobjetivo para edificios
comerciales de clima desértico muy seco.***

PRESENTA
ANA SOFÍA SANTIBÁÑEZ HALPHEN

Correo electrónico UABC: ssantibanez@uabc.edu.mx

Identificador ORCID: 0000-0002-3321-1774

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ANÍBAL LUNA LEÓN

Identificador ORCID: 0000-0003-3480-0607

CODIGO QR VINCULADO AL REPOSITORIO VIRTUAL DEL MYDAUD

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

NOVIMEMBRE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA



DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Adecuación ambiental multiobjetivo para edificios comerciales de clima desértico muy seco.

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

ANA SOFÍA SANTIBÁÑEZ HALPHEN

Correo electrónico UABC: ssantibanez@uabc.edu.mx

Identificador ORCID: 0000-0002-3321-1774

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ANÍBAL LUNA LEÓN

Identificador ORCID: 0000-0003-3480-0607

COMITÉ TUTORIAL:

DR. GONZALO BOJÓRQUEZ MORALES

Identificador ORCID: 0000-0001-9303-9278

DRA. CRISTINA SOTELO SALAS

Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

DR. MARCOS EDUARDO GONZALEZ TREVIZO

Identificador ORCID: 0000-0002-7382-2641

DRA. VERÓNICA JIMÉNEZ LÓPEZ

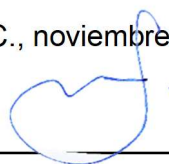
Identificador ORCID: 0000-0003-1564-1479

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, NOVIEMBRE 2024

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un gradoacadémico 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., noviembre del 2024



Ana Sofía Santibáñez Halphen

DEDICATORIA

A mis padres, Aura Halphen Alvarado y Alejandro Santibáñez Alejandro: sus enseñanzas, amor y guía son motores de superación; gracias por inculcarme los valores de libertad, ética, educación y cultura. A mis hermanos, Angélica y Alejandro: su apoyo y ejemplo son pilares clave en mi vida; gracias por recordarme por lo que vale luchar. A mis abuelas Elva y Gaby, por su resiliencia y perspectiva de vida. A mi familia en México y Panamá: por darme alas para explorar mundos y estar siempre presentes.

A Daniela Valenzuela y Karen González gracias por estar en mis días azules y recordarme que nuestra esencia permanece. A Estefhanya Estrada, tu amor y compañía hicieron posible la culminación de este Doctorado, gracias por acompañarme en este viaje. A Carlos García Collins, te admiro amigo; Barcelona es una de las tantas etapas que atesoro. A Luis Emilio, Paula Camila y todos los que me sostienen desde distintas ciudades, así como a mis clientes y alumnos, por motivarme a ser mejor persona y profesional; todo el conocimiento también es para ustedes.

Dedico este trabajo a quienes atraviesan su etapa azul: siempre hay un refugio mientras la tempestad se desvanece... La investigación, por ejemplo.

Parece el mismo viaje y la misma nave, pero ya nada es igual.

No mejor. No peor. Solo es.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Aníbal Luna León, director de esta tesis, profesor e investigador de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por su invaluable tiempo, guía, conocimientos y consejos; aprender de usted es un honor. A la Dra. Verónica Jiménez López, Dra. Luz de Crystal Berenice Vizcarra Romero, Dr. Gonzalo Bojórquez Morales, Dra. Cristina Sotelo Salas, Dr. Jorge Alberto Cid-Cruz, Dra. Adriana Margarita Arias Vallejo y Dr. Alejandro A. Lambert Arista, profesores e investigadores de la UABC, por su generosa asesoría y apoyo durante esta investigación.

Al Dr. Carlos Escobar del Pozo, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Colima, y al Mtro. Jorge Guzmán Muñiz, de la Facultad de Psicología, por su tiempo y asesoría durante la estancia de investigación. Asimismo, al Dr. César Porras Amores, profesor e investigador de la Escuela Técnica Superior de Edificación en la Universidad Politécnica de Madrid, así como al grupo de investigación de Tecnología y Medio Ambiente (TEMA) por recibirme y brindar recomendaciones para enriquecer el experimento.

Al La Casa del Tutuli y Almacén, por permitir el acceso a sus instalaciones para el trabajo de campo. A la UABC, especialmente a la Facultad de Arquitectura y Diseño, por ser mi casa de estudios, y al Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño, por facilitar la realización de mis estudios. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, por la beca otorgada durante los estudios de Doctorado, así como a mis padres, hermanos y abuela por su apoyo financiero, expreso mi más sincero agradecimiento.

Finalmente, más no menos importante: a Alejandro Santibáñez Halphen, tu ejemplo hizo posible que me animara a iniciar esta etapa, pero gracias a tu apoyo la he podido culminar; al Universo, por no soltarme; y a Sofía del pasado, que encontró en esta investigación una motivación para seguir.

RESUMEN

Esta investigación explora la optimización ambiental y energética en edificios comerciales ubicados en climas desérticos. El estudio se enfoca en determinar sistemas constructivos que reduzcan el consumo energético, carbono incorporado y mantengan condiciones de confort térmico. La relevancia de este estudio radica en la creciente demanda energética en climas extremos, donde la operación de sistemas de enfriamiento representa un alto consumo de recursos y costos. Mexicali, con sus temperaturas extremas durante el verano, presenta un contexto ideal para probar soluciones constructivas que puedan implementarse en condiciones similares, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de estos edificios a través de un enfoque sustentable. Para evaluar el rendimiento de distintas configuraciones constructivas, se utilizarán simulaciones computacionales en DesignBuilder, implementando optimización multiobjetivo para analizar el comportamiento termoenergético de los sistemas seleccionados. Se recopilaron datos sobre consumo energético, cantidad total de carbono emitido y parámetros de confort térmico. La metodología incluye simulaciones de escenarios diversos y análisis multiobjetivo para evaluar el impacto de las variaciones en materiales, espesor de aislamiento y tipos de construcción. Los resultados identifican combinaciones óptimas de sistemas constructivos para muros y cubiertas que maximizan la eficiencia energética y minimizan el carbono incorporado, sin comprometer el confort. Estas conclusiones ofrecen lineamientos de diseño aplicables a climas desérticos, con el potencial de reducir significativamente la huella ambiental en edificaciones comerciales. Finalmente, este estudio ofrece una guía práctica, respaldada en evidencia, para mejorar la sustentabilidad de edificios comerciales en climas extremos, alineada con objetivos globales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética.

ABSTRACT

This research explores environmental and energy optimization in commercial buildings located in desert climates. The study focuses on identifying construction systems that reduce energy consumption, embodied carbon, and maintain thermal comfort conditions. The relevance of this study lies in the growing energy demand in extreme climates, where cooling system operation represents high resource consumption and costs. Mexicali, with its extreme summer temperatures, presents an ideal context for testing construction solutions that can be implemented in similar conditions to reduce the environmental impact of these buildings through a sustainable approach. To evaluate the performance of various construction configurations, computational simulations will be conducted in DesignBuilder, utilizing multi-objective optimization to analyze the thermal-energy behavior of the selected systems. Data on energy consumption, embodied carbon, and thermal comfort parameters were collected. The methodology includes simulations of diverse scenarios and multi-objective analysis to assess the impact of variations in materials, insulation thickness, and construction types. The results identify optimal combinations of wall and roof construction systems that maximize energy efficiency and minimize carbon emissions without compromising comfort. These conclusions provide design guidelines applicable to desert climates, with the potential to significantly reduce the environmental footprint of commercial buildings. Ultimately, this study offers a practical, evidence-based guide to enhancing the sustainability of commercial buildings in extreme climates, aligned with global objectives of emission reduction and energy efficiency.

ÍNDICE

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
Desafíos Ambientales en Edificios Comerciales de Clima Desértico	12
Adecuación Ambiental Multiobjetivo	15
1.2 Estado del Arte	16
1.3 Planteamiento del Problema	20
1.4 Justificación	23
1.5 Preguntas de Investigación	25
1.4 Hipótesis	25
1.5 Objetivos de Investigación	26
1.5.1 Objetivo General	26
1.5.2 Objetivos Específicos	26
1.7 Alcances y Limitaciones	26
1.6 Metas	29
Capítulo 2: Marco Teórico	30
2.1 Adecuación Ambiental Comercial de Clima Desértico	30
2.1.1 Edificio Comercial	31
2.1.2 Bioclima	32
Descripción Climática.	32
2.2 Técnicas de Adecuación Ambiental	34
2.2.1 Sistematización de la Arquitectura	35
2.2.3 Arquitectura Bioclimática	36
2.2.4 Parámetros de Diseño de Edificios Comerciales	37
Técnicas de Adecuación Ambiental	39
2.3 Eficiencia Energética en Edificios Comerciales de Clima Desértico	41
2.3.1 Consumo Energético de Edificios Comerciales	41
2.3.2 Huella de Carbono	43
2.3.3 Estrategias de Mejora para la Eficiencia Energética (Marco Normativo)	46
Nacional	46
Internacional	47
2.3.3 Modelos de Consumo Energético en la Edificación	48
2.3.4 Integración de Sistemas de Energía Renovable	49
2.4 Adecuación Ambiental Multiobjetivo	50
2.4.1 Enfoque Multiobjetivo en la Adecuación Ambiental	51
2.4.2 Algoritmos Genéticos.	52

2.4.3 Optimizaciones en Simulación Dinámica.	53
2.4.4 Validación de simulación termo-energética	55
Capítulo 3: Metodología	57
3.1 Características de la Investigación	57
3.1.1 Enfoque de Investigación	58
3.1.2 Tipo Investigación	58
3.1.3 Variables de Estudio	58
3.1.4 Periodicidad	62
3.2 Adecuación Ambiental	62
3.2.1 Diagnóstico Bioclimático	62
3.2.2 Técnicas de Adecuación Ambiental	65
3.3 Evaluación Ambiental	68
3.3.1 Eficiencia Energética	68
3.3.2 Costo energético	69
3.3.3 Confort ambiental interior	72
3.3.4 Carbono incorporado	73
3.4 Simulación Dinámica Multiobjetivo	74
3.4.1 Validación de Simulación	75
3.4.2 Parámetros de simulación	77
Capítulo 4: Resultados	80
4.1 Eficiencia energética de combinación de muros y cubiertas sin aislamiento	80
4.1.1 Eficiencia energética de Muros	87
4.1.2 Eficiencia energética de cubiertas.	88
4.1.3 Eficiencia energética en periodo climatizado	91
4.2 Eficiencia energética y carbono incorporado de sistemas constructivo.	94
4.2.1 Demanda de Refrigeración	94
4.2.2 Eficiencia Energética estacional	96
4.4.3 Comparación de Temperatura Interior Promedio Entre Sistemas Constructivos.	99
4.4.4 Carbono incorporado	102
4.2 Estudio Multiobjetivo	104
4.2.1 Optimización por Frente de Pareto	104
4.2.3 Análisis de Sensibilidad	105
4.2.4 Consumo Energético y Costo de energía	106
4.5.2 Análisis de optimización	107
4.5 Recomendaciones de Diseño	111
Capítulo 5: Conclusiones	113
Referencias	119
Anexos	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de establecimientos en México. Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019).....	31
Figura 2. Características de la investigación. Elaboración propia	57
Figura 3. Diagrama de sistemas constructivos evaluados. Elaboración propia	60
Figura 4. Carta psicrométrica para Mexicali, Baja California	66
Figura 5. Metodología para calibrar la simulación. Elaboración propia a partir de Tüysüz y Sözer, (2020).	76
Figura 6. Balance térmico anual para envolvente de acuerdo con la NOM-008-ENER-2011	83
Figura 7. Balance térmico de la envolvente para BC0-VC0 y LB2-LC0.....	84
Figura 8. Balance térmico para LB2-SD2 y BC0-LC0	86
Figura 9. Relación de Consumo por refrigeración y costo energético de sistemas constructivos.	87
Figura 10. Consumos energéticos y balance térmico de combinaciones de SC ...	89
Figura 11. Consumo energético y ganancias por envolvente	90
Figura 12. Consumo de carga interna: LC2-LC0 y BC0-VC0	91
Figura 13. Balance térmico para combinaciones de SC.....	93
Figura 14. Eficiencia en carga de refrigeración en combinaciones de SC.....	95
Figura 15. Eficiencia energética estacional: BC0-VC2 y LB1-SD2	97
Figura 16. Ganancias térmicas contra costo por refrigeración anual y de verano .	97
Figura 17. Reducción en CO ₂ por sistema constructivo.	103
Figura 18. Optimización por Frente de Pareto en simulación para refrigeración .	104
Figura 19. Balance energético de la mejor combinación contra la NOM-008	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Día típico de TBS para Mexicali	33
Tabla 2. Alcance de variables para eficiencia energética.....	59
Tabla 3. Variables y valores de carbono incorporado para materiales	59
.Tabla 4. Variables para variable dependiente 3	60
Tabla 5. Materiales y propiedades térmicas.....	61
Tabla 6. Cédula de características sobre unidad de análisis.....	61
Tabla 7. Condición climática del caso de estudio.....	63
Tabla 8. Temperatura de bulbo seco promedio en Mexicali, Baja California	64

Tabla 9. Humedad Relativa promedio en Mexicali, Baja California	64
Tabla 10. Propiedades térmicas de sistemas constructivos en la envolvente.	66
Tabla 11. Variaciones de costos energéticos para PDBT en 2023.....	70
Tabla 12. Extracto de resultados de simulaciones y costo energético.....	71
Tabla 13. Parámetros sobre condiciones de confort térmico interior comercial.	72
Tabla 14. Relación de módulos con las características de investigación.	74
Tabla 15. Datos para modelado y simulaciones energéticas	77
Tabla 16. Propiedades de sistemas constructivos en la envolvente.....	78
Tabla 17. Resultados estadísticos de simulaciones termo-energéticas.....	82
Tabla 18. Ganancias en envolvente y temperatura interior de SC	99
Tabla 19. Ganancias térmicas, confort y CO ₂	106
Tabla 20. Descriptivo de soluciones optimas multiobjetivo.....	108

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de eficiencia energética y reducción de contaminantes en el sector de la construcción ha impulsado el desarrollo de estrategias que mejoren el desempeño ambiental de los edificios. Los edificios comerciales en climas desérticos, como el de Mexicali, Baja California, enfrentan desafíos específicos debido a las temperaturas extremas que incrementan el consumo energético para enfriamiento, generando altos costos y un significativo impacto ambiental. En este contexto, la presente investigación busca optimizar sistemas constructivos que reduzcan el consumo energético y el carbono incorporado de los materiales de la envolvente, mientras mejoran el confort térmico, proporcionando soluciones prácticas y sostenibles.

Este estudio es relevante porque en zonas de alta demanda energética, como Mexicali, reducir el consumo de energía en edificios comerciales contribuye a la mitigación del cambio climático y a alcanzar metas de sostenibilidad. La investigación aborda la eficiencia de estos edificios en condiciones climáticas extremas, un área poco explorada, proporcionando pautas para construir de manera más sostenible en regiones de clima desértico.

El objetivo principal es identificar combinaciones de sistemas constructivos para muros y cubiertas que optimicen la eficiencia energética y el confort en edificios comerciales en climas desérticos. Para lograr esto, se implementaron simulaciones computacionales en DesignBuilder con técnicas de optimización multiobjetivo, evaluando el consumo energético, carbono incorporado y confort térmico de diferentes configuraciones constructivas.

La estructura del trabajo abarca desde una revisión de antecedentes y diagnóstico bioclimático del sitio, hasta el análisis de resultados, donde cada sección aporta elementos clave para comprender el comportamiento de los sistemas constructivos en términos de eficiencia y confort en condiciones desérticas. Entre las limitaciones se encuentra la dependencia de simulaciones y la variabilidad de los costos y disponibilidad de materiales.

Este estudio ofrece una guía práctica basada en evidencia para mejorar la sostenibilidad en edificios comerciales en climas extremos, apoyando a desarrolladores y diseñadores en la adopción de prácticas de construcción sostenibles alineadas con metas globales de eficiencia energética y reducción de emisiones de dióxido de carbono.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo marca el inicio del estudio científico al proporcionar una visión general de los objetivos, contexto y relevancia de la investigación. Establece la teoría y presenta estudios previos que respaldan la importancia del tema y su contribución al conocimiento existente. Se abordan aspectos clave como la formulación de preguntas y objetivos generales y específicos, las hipótesis, la revisión de la literatura, la delimitación y el alcance del estudio, así como las metas a alcanzar.

1.1 Antecedentes

Este apartado de antecedentes ofrece un marco histórico y descriptivo a múltiples escalas para comprender la adecuación ambiental multiobjetivo en la arquitectura. Se analiza la evolución de las prácticas de diseño y construcción sostenible, destacando conceptos y avances que han facilitado la integración de la calidad ambiental interior y la eficiencia energética.

Las secciones se enfocan primero en los desarrollos teóricos para resolver los desafíos ambientales en edificios comerciales quienes resaltan la importancia de una arquitectura integral y adaptable con prácticas como la construcción ecológica y la arquitectura bioclimática, que han reducido el impacto ambiental del sector. Finalmente, se aborda la innovación en el diseño bioclimático y sus beneficios para la sostenibilidad y la salud humana mediante la adecuación ambiental multiobjetivo.

Esta revisión permitió contextualizar el estudio dentro del campo académico, se estableció una base para el desarrollo de las preguntas de investigación y la formulación de hipótesis. Este análisis proporciona una base para entender los desafíos y oportunidades en la implementación de estrategias de adecuación ambiental multiobjetivo, especialmente en edificios comerciales de climas desérticos.

Desafíos Ambientales en Edificios Comerciales de Clima Desértico

La construcción y operación de edificios comerciales en climas desérticos presentan desafíos significativos tanto en términos energéticos como ambientales ya que estos entornos se caracterizan por temperaturas extremas, baja humedad y radiación solar intensa, lo que genera una alta demanda energética para mantener condiciones interiores confortables (Stasi et al., 2020).

Este subapartado explorará las complejidades y desafíos específicos relacionados con la eficiencia energética y la gestión ambiental en edificios comerciales ubicados en climas desérticos, destacando la importancia de soluciones innovadoras y sostenibles que equilibren el confort interior con el respeto al entorno exterior.

La demanda mundial de energía ha aumentado significativamente debido al rápido crecimiento urbano, lo que ha contribuido al calentamiento global principalmente por las emisiones de gases contaminantes generadas en entornos construidos (Pachauri y Meyer, 2019). Ante este escenario, la eficiencia energética comenzó a ser promovida como política pública a finales de la década de 1980 (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018). En 2021, la (Comisión Nacional para el Uso de Eficiencia de la Energía [CONUEE], 2018) fue creada para fomentar el uso de tecnologías y combustibles limpios, ha lanzado varias iniciativas destinadas a reducir el consumo energético en México, especialmente en el sector residencial.

Entre estas iniciativas destacan programas como "Cambia tu viejo por uno nuevo" (2012), "Luz Sostenible" (2009-2012) y "Ahórrate una luz" (2015), orientados a sustituir equipos y luminarias por versiones más eficientes. También se han impulsado proyectos como la "Hipoteca Verde" desde 2009 y el "Programa de Mejoramiento Sostenible en Vivienda Existente", los cuales promueven la sostenibilidad en la vivienda (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018).

Sin embargo, en el sector comercial, la CONUEE ha desarrollado solo dos programas principales. El primero fomenta la implementación de sistemas que optimicen el uso de la energía en instalaciones comerciales, y el segundo, "Eco-crédito Empresarial", ofrece financiamiento a tasa preferencial para la adquisición de equipos que reduzcan los costos operativos mediante el ahorro y uso eficiente de la energía (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018).

Es fundamental destacar que cumplir con criterios de eficiencia energética no necesariamente asegura la creación de un microclima interior óptimo dentro de los edificios. Es importante tener en cuenta que la mayoría de los edificios comerciales actuales fueron construidos antes de que se implementaran los programas de eficiencia energética (Mancini et al., 2020). El consumo energético de un edificio varía según factores como el clima local, su diseño arquitectónico, la calidad de los métodos de construcción empleados, la gestión energética y de uso, y los sistemas de control. Además, los edificios están constantemente expuestos a diversas influencias físicas que inciden dinámicamente en su consumo energético. Entre estas influencias físicas se

encuentran las variaciones de temperatura y humedad exterior, las diferencias de presión entre el interior y el exterior, la radiación solar directa e indirecta, el efecto del viento en la envolvente y las pérdidas de energía por infiltración y exfiltración de aire. La orientación del edificio y la masa térmica de sus materiales también desempeñan un papel importante, ya que afectan la acumulación y liberación de calor en respuesta a las condiciones climáticas exteriores. Todas estas variables físicas se combinan para determinar la carga térmica del edificio, que a su vez impacta en el uso de sistemas de climatización y, en consecuencia, en su consumo energético total.

La investigación sobre la calidad del ambiente interior (IEQ, por sus siglas en inglés *Indoor Environmental Quality*) se inició a finales de la década de 1960 y se considera una de las características más importantes de los edificios sostenibles. Esta investigación abarca las condiciones del edificio y sus interacciones con los factores que afectan a los ocupantes en el ambiente interior y exterior (Larsen et al., 2020); aunque resulta desafiante lograr un buen ambiente interior desde la perspectiva de la eficiencia energética, no se debe justificar ningún sacrificio en la calidad del ambiente interior para reducir el consumo de energía.

Por otra parte, teorías expuestas por (Alexander, 1971; Gonzalo y Nota, 2019; Kubba, 2017; N. Salingaros, 2018); subrayan la importancia de adoptar una perspectiva holística en la Arquitectura, que utilice un lenguaje accesible para los profesionales del sector de la construcción y, a su vez, sea adaptable a las necesidades específicas de cada edificación. En este contexto, prácticas como la construcción ecológica, la arquitectura bioclimática y el diseño de edificios sostenibles han demostrado ser eficaces para mitigar el impacto ambiental negativo asociado con la construcción en un entorno determinado.

La innovación es clave para la construcción sostenible, motivo por el cual se busca promover edificaciones con diseños bioclimáticos; ya que, al emplear técnicas apropiadas para reducir el consumo energético y mejorar la calidad ambiental interior de los edificios se tienen beneficios ambientales, y esto, a su vez, puede tener un impacto positivo en la salud humana (Karimi et al., 2023).

Así pues, la construcción sostenible se ha vuelto atractiva para el sector no residencial a través de certificaciones que otorgan valor agregado a los edificios. Sistemas de clasificación como el Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED), pionero en Estados Unidos, la Certificación para el Bienestar (WELL) y la Certificación para la Excelencia en Diseño para Mayores Eficiencias (EDGE) han impulsado enfoques

holísticos en la construcción al considerar aspectos como eficiencia energética, calidad ambiental, adaptación al sitio, bienestar del usuario y prácticas sostenibles de ahorro de recursos (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], 2024).

Estas iniciativas han dado lugar a un considerable número de edificios certificados a nivel mundial, llegando a un total de 197,000 hasta el año 2024. Estos edificios, algunos ya terminados y otros en proceso de construcción, incorporan diversas estrategias de diseño pasivo, sistemas HVAC eficientes y tecnologías inteligentes (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], 2024). Sin embargo, (Lumpkin et al., 2020) destaca que es importante considerar que el proceso de certificación puede variar y no siempre garantiza un edificio con eficiencia energética, pues la complejidad de lograr una solución holística para la edificación radica en los múltiples factores que influyen en el comportamiento del edificio.

Los edificios comerciales en climas desérticos enfrentan varios desafíos ambientales, como la necesidad de adaptar estructuras construidas antes de los estándares de eficiencia energética y las emisiones de gases como el dióxido de carbono que contribuyen al calentamiento global; y aunque existen programas específicos para el sector comercial, como la implementación de sistemas eficientes y créditos, la mayoría de las iniciativas se dirigen al sector residencial, dejando un vacío significativo en la promoción de la eficiencia energética y la sostenibilidad en los edificios comerciales.

Adecuación Ambiental Multiobjetivo

En el contexto actual de cambio climático y creciente demanda energética, la adecuación ambiental de los edificios se ha convertido en una prioridad con el objetivo de reducir el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en edificaciones comerciales, especialmente en climas desérticos (Kairies-Alvarado et al., 2021).

La adecuación ambiental multiobjetivo implica la utilización de métodos de simulación para identificar y aplicar estrategias de diseño y operación que mejoren simultáneamente múltiples aspectos del rendimiento de un edificio (Liu y Pouramini, 2021), como la eficiencia energética, las emisiones de CO₂ y la calidad del ambiente interior; este enfoque permite abordar de manera integral los desafíos asociados con la sostenibilidad de los edificios en entornos difíciles, como los climas desérticos.

La simulación dinámica de edificios se ha consolidado como una herramienta esencial en el proceso de diseño y evaluación de estrategias de adecuación ambiental, pues los investigadores y diseñadores pueden modelar el comportamiento energético de

un edificio, evaluar su impacto ambiental y predecir el desempeño de diversas soluciones arquitectónicas y tecnológicas antes de su implementación (Santos-Herrero et al., 2021); lo que facilita la toma de decisiones informadas, que optimizan el consumo energético y reducen el carbono incorporado (en materiales) y/o carbono operacional (por el uso de electricidad).

Las técnicas de simulación aplicadas en la adecuación ambiental multiobjetivo pueden integrar variables como la orientación del edificio, los materiales de construcción, los sistemas de ventilación y los dispositivos de control de iluminación; mediante una simulación se puede evaluar el impacto de diferentes configuraciones y optimizar el diseño del edificio para lograr un equilibrio óptimo entre confort, eficiencia energética y sostenibilidad, como en los estudios de (Elaouzy y El Fadar, 2022; Nateghi y Kaczmarczyk, 2023; Zou et al., 2021).

Un ejemplo destacado de estas innovaciones son los edificios de Energía Neta Cero, cuyo enfoque de diseño y construcción implementa estrategias prácticas y eficientes para minimizar las demandas energéticas de los edificios, utilizando energías limpias; su objetivo es generar la misma cantidad de energía que consumen a lo largo del tiempo, todo ello con un diseño adaptado a las condiciones climáticas específicas del entorno (Ballarini et al., 2019).

Los beneficios de la adecuación ambiental multiobjetivo incluyen una mayor eficiencia energética, reducción de costos operativos y una mejor calidad de vida para los ocupantes de los edificios; sin embargo, la implementación de estas estrategias también enfrenta desafíos, como la necesidad de inversiones iniciales significativas, la complejidad en la integración de sistemas y la variabilidad en los resultados de la simulación (Sulaiman y Mustafa, 2023).

A pesar de estos desafíos, el enfoque multiobjetivo ofrece una oportunidad valiosa para avanzar hacia un futuro más sostenible. A través de la optimización y la simulación, es posible identificar soluciones personalizadas que mejoren el rendimiento de los edificios en climas desérticos, reduciendo su impacto ambiental y contribuyendo al bienestar de sus ocupantes; es por ello que la investigación y desarrollo continuos en esta área son esenciales para lograr un entorno construido más sostenible y resiliente.

1.2 Estado del Arte

El estado del arte proporciona una visión general de los principales estudios y desarrollos en el campo de la adecuación ambiental y la eficiencia energética en climas

desérticos. Este análisis se enfoca en identificar contribuciones significativas, tendencias emergentes y lagunas en el conocimiento, que establecen un marco conceptual sólido para esta investigación.

En un estudio realizado por (Nateghi y Kaczmarczyk, 2023) se investigó la relación entre la calidad ambiental interior (evaluada mediante la concentración de dióxido de carbono (CO₂), el confort térmico (Porcentaje Previsto de Insatisfacción) y la eficiencia energética (evaluada mediante la demanda energética anual) al aplicar ventilación natural en un aula de clases en dos climas diferentes (húmedo y tropical). A través de la optimización del control y del área de apertura de una ventana, así como del control del termostato, se concluyó que: (1) la ventilación natural mejoró significativamente la calidad del aire interior mediante un controlador de temperatura, pero aumentó la demanda energética; (2) la modificación del rango de confort térmico (19-27°C) mejoró el rendimiento del controlador de temperatura; y (3) al realizar la optimización, se logró cumplir el objetivo en más del 50% del tiempo para ambos climas. Este estudio subraya la complejidad de equilibrar el confort ambiental y la eficiencia energética en climas extremos y resalta la necesidad de adaptar soluciones específicas para climas desérticos.

Otro aporte relevante proviene de (Bougrine y Gosselin, 2023) quienes examinaron el diseño estructural de una envolvente de madera mediante optimización multiobjetivo. Sus hallazgos sugieren configuraciones estructurales óptimas que limitan el diámetro de apertura en vigas con tres posibles configuraciones: (1) limitar el diámetro de apertura de una viga al 15% de su altura; (2) restringir el diámetro al 30% de la altura de la viga; y (3) no permitir aperturas en los conductos situados por debajo de la viga. Aunque este estudio se centra en envolventes de madera, su metodología y uso de algoritmos genéticos ofrecen valiosas lecciones para el diseño en climas áridos, como el uso de materiales con alta masa térmica.

Además, los estudios sobre edificios de Energía Neta Cero ilustran enfoques innovadores para reducir la demanda energética mediante el uso de energías limpias, lo que permite generar tanta energía como se consume a lo largo del tiempo, lo que se muestra en el estudio de (Ballarini et al., 2019), aunque este enfoque está orientado a climas templados; se observa una laguna en la literatura para adaptar estos principios a climas desérticos, donde el desafío energético es considerablemente mayor debido a las condiciones climáticas extremas.

(Martínez-Comesaña et al., 2022) desarrollaron un modelo de interpolación basado en optimización algorítmica para estimar la temperatura de bulbo seco (TBS), la

humedad relativa (HR) y el CO₂ al interior de un edificio; según sus hallazgos, tras un período de monitoreo de siete meses utilizando la optimización, es posible estimar la TBS y la HR con un error menor al 6%, y el CO₂ con un error menor al 10%.

(Sulaiman y Mustafa, 2023) llevaron a cabo un estudio centrado en la optimización para mejorar el confort del usuario y reducir el consumo energético en edificios inteligentes. Consideraron variables como el confort térmico, visual y la calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés). Propusieron un algoritmo evolutivo que compararon con otros algoritmos genéticos, y concluyeron un rendimiento notable al obtener valores de confort visual de 0.98 a 1, con una reducción del 60% en el consumo energético, sin embargo, en relación con el IAQ, sus resultados mostraron una mejora significativa durante las primeras 24 horas, pero después de ese período, el consumo energético aumentó debido a la ocupación o a los requisitos de ventilación para mantener las condiciones de IAQ.

(Souayfane et al., 2022) proponen una metodología que emplea agrupamiento meteorológico y simulación multiobjetivo para evaluar el sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) en términos de costo energético y niveles de confort interior. Mediante la combinación de esta técnica con la optimización, se determinan estrategias de operación de enfriamiento que minimizan simultáneamente el consumo energético y el desconfort térmico.

Enfocado en edificios residenciales, el estudio de (Nateghi y Kaczmarczyk, 2023) emplea la optimización multiobjetivo para mejorar tanto el confort térmico interior como la eficiencia energética. Como resultado, proponen diversas propuestas para el diseño de la envolvente, logrando reducir el uso del sistema HVAC en un 74.25% y mejorar el confort térmico interior en un 4.32% en comparación con el diseño base.

Mediante un diseño paramétrico (M. ElBatan y Ismaeel, 2021) investigaron el equilibrio entre la iluminación natural y el confort visual en la envolvente de un edificio de oficinas ubicado en un clima desértico muy seco. A través de la simulación paramétrica, exploran 36 configuraciones diferentes que varían en el porcentaje de perforación y el grosor de la envolvente. Basándose en los criterios de la Certificación LEED, determinan que la mejor configuración para cumplir con los requisitos es una perforación del 60% con un espesor de 40 a 60 cm.

(Liu y Pouramini, 2021) realizaron un análisis de evaluación paramétrica en las etapas iniciales de un proceso de optimización con el objetivo de reducir el número de simulaciones necesarias. Se plantean dos objetivos: el confort térmico interior y la

minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero. Concluyen que el espesor del aislamiento exterior en los muros y la cubierta, la hermeticidad y el aislamiento del piso son los parámetros más significativos que impactan en el consumo energético. Posteriormente, se consideran la iluminación natural, el control de temperatura y la sustitución de ventanas, que también contribuyen a reducir el consumo energético.

(Widera, 2021) Propone la aplicación de técnicas bioclimáticas en un edificio residencial ubicado en un clima árido seco. A través de un monitoreo ambiental y encuestas a los usuarios, junto con la carta de Olygyay, demuestra que colocar aberturas pequeñas en la parte superior de una habitación o en la cubierta facilita la salida del aire caliente, lo que mejora el confort térmico y reduce las concentraciones de CO₂.

(Lakhdari et al., 2021) emplea la optimización paramétrica para mejorar la calidad de la iluminación natural, el confort térmico y reducir el consumo energético al ajustar los parámetros de la envolvente de un salón de clases. Estos parámetros incluyen la relación entre la apertura y el muro (WWR), los sistemas constructivos de los muros y las ventanas, junto con sistemas de sombreado; concluye que, en varios casos, el uso del 60% de WWR combinado con acristalamiento eficiente, mejora con respecto al caso base. Se recomienda un WWR del 30% para la orientación norte, del 40% para la sur y del 50-60% para el este y oeste.

(Dovjak y Kukec, 2019) abordan mediante una monografía científica, la calidad ambiental interior al proporcionar una visión integral de estudios epidemiológicos, datos estadísticos y quejas de los usuarios. Su análisis demuestra las consecuencias negativas de las prácticas actuales de diseño, sugiriendo que hasta un 30% de los edificios nuevos y remodelados en todo el mundo podrían estar asociados con entornos interiores poco saludables que derivan en riesgo para la salud de los ocupantes.

En el estudio de (Shaeri et al., 2019), se determina la relación óptima entre el área de ventanas y la superficie de muros en las fachadas de edificios, con el objetivo de reducir las pérdidas de energía. Mediante simulación en el programa DesignBuilder® evalúan las ganancias anuales de calor solar, HVAC y de iluminación para las tres ciudades dependiendo del WWR; sus resultados muestran que el área óptima de ventana para fachada norte en todos los climas es del 20-30%; del 20 al 30%; y 10-30% para la fachada sur respectivamente a los climas analizados.

(Vaisi y Kharvari, 2019) evaluaron mediante Factor Luz Día la validez de la relación WWR por regulaciones de Irán, además, se evaluó la relación de uniformidad para descubrir y controlar la calidad de la iluminación natural. Analizaron 24 muestras de

diferentes tamaños de ventanas función de la forma, el tamaño y las dimensiones del espacio de la ventana en dos módulos diferentes, el primero de 24 m², y el segundo, de 12 m². Los resultados revelaron que el estándar de V-M actual no es preciso. Basándose en certificaciones reconocidas como LEED y BREEAM, se propuso un rango óptimo para el V-M, situado entre el 15% y el 24%. Esta propuesta también aborda el control del deslumbramiento y el sobrecalentamiento, lo que contribuye a mejorar la calidad general de la iluminación natural en los espacios evaluados.

Si bien hay una cantidad significativa de investigaciones en calidad ambiental interior y eficiencia energética, pocos estudios han abordado de manera integral estos aspectos en edificios comerciales de climas desérticos muy secos, como el de Mexicali, Baja California. La investigación actual tiende a enfocarse en climas templados y tropicales, generalmente abordando un solo aspecto del diseño sin integrar de manera efectiva la eficiencia energética, la reducción de carbono incorporado y la calidad ambiental interior. Esto subraya la necesidad de desarrollar enfoques adaptativos que permitan optimizar el diseño de edificios comerciales en condiciones desérticas extremas.

Un aspecto clave en la presente investigación es el uso de algoritmos genéticos en la optimización multiobjetivo, a diferencia de estudios multivariable, la optimización multiobjetivo permite encontrar soluciones óptimas que equilibran diferentes objetivos, como la reducción de carbono incorporado y la mejora del confort interior. Esta distinción es esencial para comprender la relevancia de los algoritmos genéticos en esta investigación y su ventaja al explorar múltiples dimensiones del diseño ambiental.

En conclusión, aunque los estudios revisados ofrecen aportes importantes en eficiencia energética y calidad ambiental, su aplicación en climas desérticos muy secos sigue siendo limitada. Las estrategias de adecuación ambiental en este contexto presentan desafíos particulares, y se observa una laguna en el uso de metodologías multiobjetivo aplicadas a estos climas, por lo que, esta investigación busca llenar dicha laguna proponiendo una adecuación ambiental multiobjetivo que responda a las condiciones extremas del clima de Mexicali, Baja California.

1.3 Planteamiento del Problema

El progreso y la evolución de la Arquitectura han estado estrechamente relacionados con la necesidad del ser humano de resguardarse de entornos adversos; no obstante, un aspecto constante en el desarrollo arquitectónico, es que las ciudades y sus estructuras interfieren y desplazan el ecosistema natural, alterando el equilibrio biológico

(Martínez, 2018; N. Salingaros, 2018). Por consiguiente, la construcción de edificaciones que no se integran armónicamente con su entorno plantea un desafío que resolver.

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible como parte de la Agenda 2030; los cuales plasman una visión holística de desarrollo a largo plazo que busca transformar tanto los patrones de vida de las personas como las políticas gubernamentales, que propone el principio de igualdad y dignidad para todos, en armonía con el respeto al medio ambiente (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, 2015).

La creciente urbanización y el cambio climático global han intensificado la necesidad de optimizar la eficiencia energética y reducir las emisiones de dióxido de carbono en los edificios por medio del carbono incorporado y/o carbono operacional (Carrasco-Amador et al., 2022), especialmente en las regiones de clima desértico, ya que los edificios comerciales en estos entornos enfrentan desafíos únicos debido a las extremas condiciones climáticas, como las altas temperaturas diurnas, grandes variaciones térmicas entre el día y la noche y la baja humedad (E. García, 2004).

Estos factores incrementan significativamente la demanda de energía para la climatización y otros servicios esenciales, lo que se traduce en un aumento del carbono operacional. Según datos recabados por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021) en México, las construcciones dependen principalmente de combustibles fósiles y constituyen el 17% del consumo total de energía, el 5% del consumo total de agua, el 25% del consumo total de electricidad, el 20% de las emisiones de dióxido de carbono y el 20% de los residuos generados.

Como parte del compromiso del Gobierno de México con el cambio climático, se estableció en 2015 una meta gradual de incorporación de energías limpias en la generación de energía eléctrica, con el objetivo de alcanzar un 25% para 2018, un 30% para 2021 y un 35% para 2024, según información proporcionada por la (Secretaría de Energía [SENER], 2020). Sin embargo, a nivel nacional, se calcula que el enfriamiento de espacios representa aproximadamente el 9.8% del consumo total de energía en edificios, con el sector comercial consumiendo 25.74 TWh en 2019 (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024).

A pesar de los avances en tecnologías de construcción sostenible y la implementación de regulaciones energéticas, muchos edificios comerciales continúan operando con baja eficiencia energética y emiten grandes cantidades de CO₂ (Castrejon-

Campos, 2022). Esto se debe, en parte, a que las estrategias de construcción y operación tradicionales no están optimizadas para las condiciones específicas de los climas desérticos; además, existe una falta de integración entre las tecnologías disponibles y las necesidades específicas de estos edificios, lo que limita su capacidad para mejorar su rendimiento ambiental de manera significativa (Attia, 2018).

La simulación multiobjetivo ofrece una solución competente para abordar estos desafíos, permitiendo a los diseñadores y gestores de edificios evaluar y optimizar simultáneamente múltiples aspectos del rendimiento energético y ambiental (Sulaiman y Mustaffa, 2023). Sin embargo, la aplicación de este enfoque en edificios comerciales ubicados en climas desérticos sigue siendo limitada, y no se han explorado completamente sus beneficios potenciales. Mientras que en otros países se ha comprobado que la optimización multiobjetivo de adecuaciones a edificios comerciales ha logrado disminuir hasta el 50% del consumo energético (Nateghi y Kaczmarczyk, 2023; Shaeri et al., 2019; Zanocco et al., 2021), en México son pocas las investigaciones enfocadas a este sector. Además, son aún menos los estudios que emplean algoritmos genéticos para cumplir con diferentes objetivos y obtener la solución óptima.

El aumento en la tasa de ocupación en interiores también ha intensificado la influencia de la calidad del ambiente interior (IEQ) en la salud física y mental de los ocupantes del edificio (Du y Wang, 2020; Narici et al., 2021); entre los diferentes aspectos del ambiente interior, la temperatura es el objetivo principal del control del sistema de calefacción y refrigeración (HVAC) ya que representa una parte significativa del consumo de energía del edificio y es un factor clave para el confort térmico de los ocupantes (Afroz et al., 2017; Jung et al., 2019). Es pues, que al comprender las técnicas de adecuación que mejoran el desempeño térmico, lumínico y de calidad de aire interior en edificios comerciales, implica la integración de diversas medidas para mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de recursos naturales y minimizar el impacto ambiental, por lo que el enfoque de simulación multiobjetivo permite identificar soluciones específicas destinadas a modificar edificios comerciales en clima cálido desértico muy seco.

El problema central de esta investigación radica en la necesidad de desarrollar y aplicar técnicas de adecuación ambiental multiobjetivo mediante simulación para reducir de manera efectiva el consumo energético y el carbono incorporado en edificios comerciales de clima desértico muy seco. A través de esta investigación, se busca identificar las barreras existentes y proponer soluciones prácticas y adaptadas a las

características específicas de estos entornos, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector de la construcción y al bienestar ambiental global.

La implementación de los principios de la arquitectura bioclimática en el diseño y construcción de edificaciones, combinada con el uso eficiente de tecnologías innovadoras para reducir el consumo energético, presenta un potencial significativo en el sector. Este enfoque no solo puede generar beneficios económicos para las empresas, sino que también puede tener un impacto positivo en el medio ambiente. Además, estas técnicas pueden ser evaluadas de manera simultánea para alcanzar diversos objetivos, lo que aumenta su versatilidad y eficacia en la búsqueda de soluciones sostenibles y rentables. Por otra parte, elegir apropiadamente las técnicas puede asegurar un nivel estable de confort ambiental interior, que beneficiaría al usuario. Este aspecto se percibe como un valor añadido a la investigación, ya que representa un área de oportunidad para la normativa mexicana, pues las investigaciones en este ámbito se centran en aspectos específicos de calidad ambiental, como el confort térmico.

1.4 Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad urgente de abordar el creciente consumo energético y carbono incorporado en edificios comerciales, especialmente en climas desérticos muy secos como el de Mexicali, Baja California. En un contexto global donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son imperativos para mitigar el cambio climático, este estudio se enfoca en proponer soluciones que armonicen el confort interior con la reducción del impacto ambiental de los edificios.

El sector comercial es responsable de una parte significativa del consumo energético total, con un enfoque particular en la climatización para el confort térmico, lo cual representa una oportunidad crítica para implementar mejoras (Chatellier Lorentzen y McNeil, 2020). Según la (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024), el enfriamiento de espacios constituye el 42% del total de energía, evidenciando la necesidad de optimizar el uso de recursos energéticos en este sector.

Investigaciones como las de (Amodio et al., 2014; Arroyo y Ojeda, 2019; Canazei et al., 2017; Chinazzo et al., 2022; Nateghi y Kaczmarczyk, 2023) concluyen que la contaminación ambiental del espacio interior tiene un impacto negativo en la salud física y mental de los individuos, lo que a su vez repercute en su productividad laboral. Este reconocimiento ha llevado a que, a partir de 2018, la normatividad mexicana comenzara a considerar la creación de entornos laborales que promuevan el bienestar de los

trabajadores mediante la introducción de la NOM-035-STPS-2018, con el objetivo de reducir los trastornos psicosociales asociados a entornos laborales desfavorables (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2018).

Este contexto, sumado a la problemática ambiental, resalta la necesidad de establecer directrices para optimizar edificaciones que se ven afectadas por la contaminación del entorno, con el objetivo de fomentar el progreso laboral y económico de una empresa. Asimismo, es importante que estas medidas promuevan la eficiencia energética de los edificios en Mexicali, Baja California.

Esta necesidad puede ser abordada mediante un análisis multiobjetivo que considere variables relacionadas con el diseño de la envolvente y su impacto en el interior del edificio (M. ElBatan y Ismaeel, 2021). El uso de simulaciones dinámicas asistidas en el diseño permite optimizar tanto el tiempo como los costos de implementación (Ordoñez García, 2017). Por lo tanto, este estudio propone llevar a cabo una evaluación detallada utilizando simulaciones dinámicas avanzadas en un entorno único; de esta manera, se busca entender la correlación de distintas partes que componen a un edificio: la carga externa, definida por su diseño y construcción, así como por las variables climáticas del lugar donde se emplaza el edificio; la carga interna, definida por las características de los equipos que consumen energía y por las actividades del usuario; y por último la reducción de dióxido de carbono, como producto de las condiciones de diseño y uso del edificio.

Además, este estudio aborda una brecha en la literatura actual en México, donde la aplicación de optimización multiobjetivo y el uso de algoritmos genéticos para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en edificios comerciales es limitada. Al explorar y validar estas técnicas, la investigación no solo contribuirá al conocimiento académico, sino que también ofrecerá pautas prácticas para la industria de la construcción, apoyando el diseño de edificaciones más sostenibles y adaptadas a su entorno.

En suma, esta investigación tiene el potencial de generar beneficios ambientales, económicos y sociales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y apoyando las metas nacionales de México para la incorporación de energías limpias. La innovación en la arquitectura bioclimática y el diseño sostenible de edificios comerciales puede ser un impulso clave para un futuro más sostenible y resiliente.

En síntesis, se busca generar conocimientos prácticos que contribuyan a mejorar tanto la eficiencia energética como la calidad ambiental de los edificios comerciales en climas cálidos. Este estudio proporcionará una guía útil para implementar medidas de adecuación, ofreciendo recomendaciones específicas adaptadas a las condiciones

climáticas de Mexicali, Baja California, tanto desde una perspectiva teórica como práctica, dirigida a profesionales del sector.

1.5 Preguntas de Investigación

Este apartado, plantea las interrogantes fundamentales que guiarán la investigación y proporcionarán un enfoque claro y estructurado para el estudio. Estas preguntas están diseñadas para explorar aspectos específicos del tema de investigación, con el fin de profundizar en su comprensión y generar conclusiones significativas.

Mediante un análisis detallado de estas interrogantes, se busca abordar los objetivos planteados y contribuir al avance del conocimiento en el área de estudio.

¿Cómo se optimiza la envolvente arquitectónica de un edificio comercial de clima desértico muy seco que reduzca el consumo energético, carbono incorporado y garantice condiciones de calidad ambiental interior?

- A. ¿Qué efecto tiene la implementación de técnicas de adecuación ambiental en el confort térmico al interior de edificios comerciales?
- B. ¿Cuál es la relación entre la reducción de carbono incorporado y la eficiencia energética con los materiales de la envolvente de edificios comerciales en climas desértico muy seco?
- C. ¿Cómo se puede extrapolar las soluciones optimizadas para aplicar a las distintas tipologías de edificios comerciales en climas desértico muy seco?

1.4 Hipótesis

Este planteamiento de investigación identifica como variables independientes a las técnicas de adecuación multiobjetivo y como variables dependientes a (1) eficiencia energética, (2) carbono incorporado, y, (3) confort térmico.

El tipo de relación de las variables es correlacional, aplicadas para edificios comerciales con delimitación geográfica de los casos de estudio en Mexicali, Baja California. Esta delimitación permite proponer la siguiente hipótesis:

La simulación dinámica multiobjetivo facilita identificar técnicas de adecuación ambiental optimizadas a partir de un análisis energético y ambiental, lo que permite su aplicación en edificios comerciales de clima desértico muy seco.

1.5 Objetivos de Investigación

A partir de las características de investigación se redactan los objetivos para orientar el estudio y guiar el proceso de recolección, análisis e interpretación de datos; es pues, que establecerlos de forma clara y precisa proporciona un marco sólido a través de un objetivo general y tres objetivos específicos, que permite una exploración detallada y estructurada del tema.

1.5.1 Objetivo General

Proponer técnicas de adecuación ambiental multiobjetivo que contribuyan a reducir el consumo energético, carbono incorporado y mejorar las condiciones ambientales interiores en edificios comerciales de clima desértico muy seco.

1.5.2 Objetivos Específicos

- 1) Determinar mediante análisis multiobjetivo en simulación dinámica avanzada, técnicas de adecuación ambiental con mejor adaptación, acorde a rangos específicos de confort térmico interior y eficiencia energética.
- 2) Estimar la eficiencia energética y ambiental de adecuaciones multiobjetivo para su implementación en edificios comerciales en clima desértico muy seco.
- 3) Clasificar en una guía de soluciones multiobjetivo las técnicas de adecuación ambiental para edificios comerciales de clima desértico muy seco.

1.7 Alcances y Limitaciones

Esta investigación se enfoca en optimizar la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica de edificios comerciales ubicados en climas desérticos muy secos. Los datos serán referidos a la unidad de análisis, representada por un edificio comercial de pequeña escala acorde al Reglamento de Edificaciones de Mexicali (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2005); ubicado en Mexicali, Baja California.

La investigación tendrá los siguientes alcances:

1. Análisis de Sistemas Constructivos (SC): La investigación abarca 69 combinaciones de materiales para muros y cubiertas, al evaluar la eficiencia térmica de materiales como bloque de concreto, ladrillo, panel de yeso y estructura metálica y Thermorock. Además, se consideran diferentes espesores de aislamiento (0.0254 m y 0.0508 m) para muros y cubiertas, optimizando la selección de materiales y estrategias constructivas.

2. Simulaciones Multiobjetivo: Se utilizan simulaciones avanzadas en el programa *DesignBuilder*® y el método de Pareto para identificar las configuraciones óptimas que maximizan la eficiencia energética y el confort interior, y minimizan el carbono incorporado. Los resultados se limitan al período de alta demanda de enfriamiento (abril-octubre) para climas cálidos y secos, que se considera crítico en la demanda energética.
3. Evaluación de Estrategias de Diseño Sostenible: Las recomendaciones derivadas de la investigación incluyen la implementación de estrategias pasivas de diseño y la selección de materiales adecuados. Estas estrategias están enfocadas en optimizar la eficiencia energética de edificios en climas desérticos, y sus resultados se compilarán en una guía práctica para el sector de la construcción comercial sostenible.
4. Comparación de Sistemas con y sin Aislamiento: Se compara el desempeño energético y el confort interior de sistemas constructivos con y sin aislamiento, analizando su influencia en el consumo energético y la estabilidad térmica estacional.
5. Evaluación de Costos Energéticos y de Carbono Incorporado: La investigación incluye un análisis comparativo de los costos energéticos (en pesos mexicano) y carbono incorporado (en kgCO₂e/kg) asociadas con cada combinación de sistemas constructivos, lo cual permite una aproximación detallada de las implicaciones económicas y ambientales de cada opción. Este alcance agrega valor en términos de sostenibilidad y viabilidad económica para el sector comercial.
6. Desempeño en Confort Térmico: Los resultados también incluyen una evaluación de estabilidad térmica y el número de horas de confort y discomfort. Esto permite determinar qué combinaciones constructivas ofrecen condiciones óptimas para los ocupantes, tomando en cuenta la relación entre confort térmico y eficiencia energética.
7. Base de Referencia para Normativas Locales: Al considerar la normativa NOM-008-STPS-2008, el estudio ofrece una comparación con los estándares nacionales, permitiendo a los profesionales del sector tener un marco de referencia que alinea los hallazgos con la normativa vigente en México. Esto hace que los resultados sean útiles tanto para el diseño como para la regulación y cumplimiento.

8. Guía para el Diseño de Envolventes en Climas Extremos: Los resultados de las simulaciones permiten crear una guía que clasifica los sistemas constructivos según su rendimiento en eficiencia energética, costo y confort interior, lo que representa una herramienta práctica para arquitectos e ingenieros en la selección de materiales y estrategias para edificios en climas similares.

Limitaciones

1. Enfoque en Climas Específicos: Los resultados y recomendaciones se limitan a edificios comerciales en climas desérticos muy secos, específicamente en un contexto similar al de Mexicali. Las soluciones propuestas podrían no ser aplicables en climas templados o húmedos sin ajustes adicionales.
2. Uso de Simulaciones: Aunque las simulaciones dinámicas ofrecen estimaciones detalladas del comportamiento energético, no sustituyen a estudios de campo o mediciones directas en edificios. Esto implica que algunos aspectos de la realidad (como la durabilidad de los materiales o factores externos imprevistos) podrían afectar los resultados al ser implementados en la práctica.
3. Limitaciones en la Evaluación de Materiales: Se utilizaron materiales comunes en la construcción actual, como bloque de concreto y ladrillo. Sin embargo, materiales innovadores como los de cambio de fase o aislantes ecológicos no se incluyeron en este análisis, limitando las recomendaciones a opciones convencionales.
4. Limitación Temporal del Análisis de Consumo Energético: El análisis se enfoca principalmente en el periodo de mayor demanda energética (abril a octubre). Si bien esto permite evaluar el comportamiento en la temporada de mayor carga térmica, una evaluación integral incluiría también los meses de baja demanda, lo cual no se abordó en detalle en este estudio.
5. Exclusión de Costos de Construcción: Aunque el estudio se centra en la eficiencia energética y los costos operativos de consumo eléctrico, no evalúa el costo inicial de construcción ni el costo del aislamiento adicional.
6. Impacto de la Ocupación y Carga Interna Variable: El modelo de simulación no considera cambios en la ocupación o en la carga térmica interna (como el uso intensivo de equipos o variaciones en horarios de ocupación), lo cual podría afectar significativamente el consumo energético y el confort en condiciones reales de uso.
7. Dependencia en Herramientas de Simulación: La precisión de los resultados depende de las configuraciones y suposiciones utilizadas en las herramientas de

simulación, que, aunque avanzadas, tienen limitaciones inherentes en la representación de la realidad. Esto significa que la validez de los hallazgos está sujeta a los algoritmos y modelos utilizados por el software, lo cual puede presentar diferencias cuando se trasladan al entorno real.

1.6 Metas

La presente investigación tiene las metas o fines siguientes:

- Planteamiento de la optimización multiobjetivo en *DesignBuilder®*, y procesamiento de datos con perspectiva de eficiencia energética y ambiental.
- Estimación del potencial energético y ambiental de las técnicas de adecuación aplicadas en un modelo de simulación dinámica avanzada, mediante optimización multiobjetivo.
- Desarrollo de una guía de eficiencia energética, que recopila técnicas de adecuación ambiental pasivas con mejor desempeño energético y ambiental para edificios comerciales en clima desértico muy seco.
- Desarrollo de una solución óptima basada en la guía de eficiencia energética para los casos de estudio, considerando el confort térmico y reducción de carbono incorporado.

Capítulo 2: Marco Teórico

El marco teórico se dividió en cuatro secciones. El primero establece la teoría que sustenta las adecuaciones ambientales para edificios comerciales en clima desértico muy seco; así pues, además de establecer las características del edificio comercial y el bioclima a partir de la clasificación de Köppen-Geiger, también se discuten diversas teorías bioclimáticas y parámetros de diseño aplicados al clima desértico muy seco.

El siguiente subapartado, presenta la eficiencia energética desde la perspectiva comercial, en la cual se discute el consumo energético en México, estrategias nacionales e internacionales para reducir el consumo de energía y aumentar el uso de tecnologías renovables, además de la Normativa Oficial Mexicana y aquellas de aplicación voluntaria; para finalmente presentar el panorama ambiental respecto al carbono incorporado por el uso de sistemas constructivos.

La tercera parte del marco teórico expone los rangos de calidad ambiental interior para edificios en clima desértico muy seco, los riesgos a la salud del usuario de no cumplirse, así como la integración de estándares y normas nacionales e internacionales.

El capítulo concluye con la adecuación ambiental multiobjetivo, en el que se analizan investigaciones que han logrado optimizar el diseño de edificios mediante simulación dinámica y algoritmos genéticos; además se presentan los tecnicismos, así como programas computacionales y métodos para la optimización basada en simulaciones.

2.1 Adecuación Ambiental Comercial de Clima Desértico

En el Censo Económico de 2018, se registraron 2,248,315 negocios dedicados al comercio en México, y esta cifra ha mostrado una tendencia al alza desde 2003, como se ilustra en la Figura 1; se emplean 7,481,987 personas, lo que posiciona al comercio como el segundo sector con mayor número de trabajadores dependientes de él, según datos del (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019).

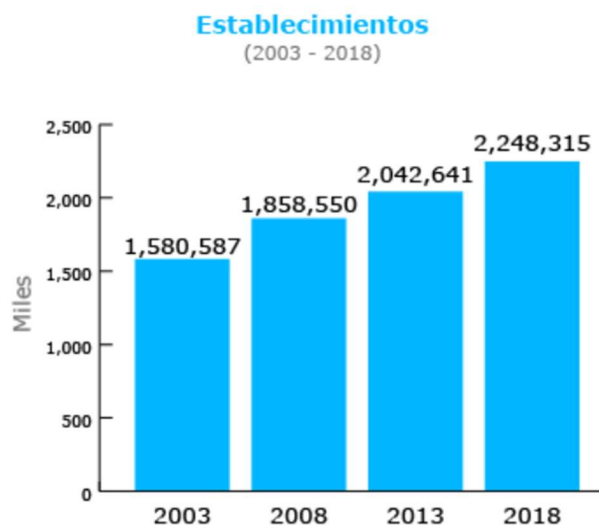


Figura 1. Número de establecimientos en México. Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019)

Las actividades comerciales abarcan una amplia gama de sectores, que incluyen la venta de productos como abarrotes, alimentos, bebidas, tabaco, ropa, calzado, artículos para el hogar, productos farmacéuticos, perfumería, artículos de entretenimiento, electrodomésticos pequeños, línea blanca, computadoras, automóviles, entre otros (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019).

La participación económica en Baja California, esta se considera "alta", con un total de 43,452 establecimientos dedicados al comercio, lo que lo coloca en el puesto 18 en la lista de entidades federativas, según datos del (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). Entre las principales actividades económicas se destacan el comercio, con un 16.2%, seguido de los servicios inmobiliarios y alquiler de bienes muebles e intangibles con un 14.2%, la fabricación de maquinaria y equipo con un 8%, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y gas por ductos al consumidor final con un 4.7%, y los transportes, correos y almacenamiento también con un 4.7%. Estas actividades representan conjuntamente el 58.8% del Producto Interno Bruto (PIB) estatal, mientras que el resto proviene de diversas actividades económicas (Secretaría de Economía, 2016).

2.1.1 Edificio Comercial

El artículo 29 del Reglamento de Edificaciones para el municipio de Mexicali, establece la clasificación de un edificio mediante tipología, rango y magnitud; en particular en la tipología 2.0 Equipamiento y abasto, conglomera en la misma tipología 2.1.2 Comercios, como aquella edificación donde se realiza la compra y venta de artículos al menudeo, a "autoservicios, venta de agua, farmacias, joyerías, boutiques y zapaterías,

cerrajerías, carnicerías, frutería y verduras, papelerías y misceláneas, mercados y abarrotes”, además en la tipología 2.1.3 Comercio alimenticio, a las edificaciones donde se preparan y sirven productos gastronómicos, que engloba a “restaurantes, cafés y fondas, comedores al aire libre y comida para llevar”, ambas tipologías comparten el rango y magnitud de comercios hasta 250 m² para una magnitud de baja escala (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2005).

En el municipio, hay un total de 35,010 unidades económicas, y aproximadamente el 83.4% de estas se encuentran en la ciudad de Mexicali. Principalmente, estas unidades se dedican a actividades relacionadas con el comercio, el turismo, las comunicaciones, los servicios y el transporte. En el área urbana de Mexicali, específicamente, el 91.7% de las empresas se enfocan en una actividad dentro de estas categorías. Además, el 95% de la actividad económica en Mexicali está representada por micro y pequeñas empresas, ya que cada una de ellas emplea a menos de 30 trabajadores para llevar a cabo sus operaciones (Gobierno de Mexicali, 2022).

2.1.2 Bioclima

El clima se define como un conjunto de condiciones meteorológicas predominantes en una región durante un período específico. Su término se relaciona con la posición de una zona en relación con la inclinación de los rayos solares, es decir, la "latitud"; y más allá de ser simplemente una media estadística de condiciones atmosféricas, el clima también se caracteriza por los extremos alcanzados por las diferentes variables, la distribución estadística y las tendencias de variación, es pues, un factor crucial que influye directamente en el confort humano, sus condiciones laborales y de recreación, y en última instancia, en su salud (Tudela, 1982).

Así pues, los índices climáticos, son aquellos que intentan sintetizar y resumir los valores más relevantes del clima, mientras que los índices bioclimáticos surgen de cálculos matemáticos y estadísticos que integran los parámetros climáticos principales, como la temperatura y la precipitación, con variables como la altitud o la latitud (Díaz, 2019).

Descripción Climática.

Mexicali se localiza entre las coordenadas geográficas 32° 43' al norte, 30° 25' al sur de latitud norte, 114° 42' al este y 115° 56' al oeste de longitud oeste; colinda al norte con Estados Unidos de América; al este, con Sonora, Estados Unidos de América y el Golfo de California; al sur el municipio de San Felipe; al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018).

Es uno de los siete municipios de Baja California, y es donde se ubica la capital del estado, se estima que la superficie territorial de Mexicali es de aproximadamente 10,000 km², es decir, poco menos del 14% en relación con la extensión territorial estatal (Gobierno de Mexicali, 2022).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger, Mexicali se caracteriza por un clima desértico cálido, identificado con el código "BWh", el cual se caracteriza por temperaturas extremas, especialmente en verano, donde las máximas pueden superar los 45°C, mientras que en invierno las mínimas pueden descender por debajo de los 5°C. La humedad relativa es consistentemente baja a lo largo del año, contribuyendo a la sensación de sequedad ambiental típica de los climas desérticos (Kottek et al., 2006).

La precipitación anual es muy baja, con un promedio de 132 milímetros, mayormente en los meses de invierno y ocasionalmente durante el verano, mientras que el flujo de vientos proviene de noroeste a suroeste la mayor parte del año (Gobierno de Mexicali, 2022). Además, la región recibe una alta cantidad de radiación solar durante todo el año, lo que no solo eleva las temperaturas, sino que también ofrece un alto potencial para el aprovechamiento de la energía solar.

Mexicali experimenta una marcada variación estacional, con veranos extremadamente calurosos y secos e inviernos más templados, pero igualmente áridos. Acorde al archivo climático de redes de monitoreo, la temperatura de bulbo seco (TBS) media anual es de 28.6°C, sin embargo, meses de junio a septiembre la temperatura promedio asciende a 45°C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2022), los valores promedio acorde al día típico del mes, se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Día típico de TBS para Mexicali

DÍAS TÍPICOS		
TEMPERATURA		
MAX	MED	MIN
22.4	14.0	6.6
22.0	14.7	8.3
27.2	19.0	11.6
29.3	21.2	13.2
34.9	26.0	17.3
38.5	29.8	20.6
40.5	33.1	25.2
41.3	33.8	26.9
39.8	31.0	22.9
33.5	24.5	16.7
25.9	18.1	11.1
21.8	13.0	6.1

En conclusión, el análisis bioclimático de Mexicali resalta las oportunidades que presenta su clima desértico, caracterizado por temperaturas extremas y baja humedad relativa, una región con veranos extremadamente calurosos, con temperaturas que superan los 45°C, e inviernos templados, donde las temperaturas pueden descender por debajo de los 5°C. La precipitación anual es escasa, concentrada principalmente en invierno, con una media de 132 milímetros. Además, la alta radiación solar y el flujo constante de vientos desde el noroeste al suroeste durante todo el año subrayan tanto los retos como el potencial para el desarrollo de estrategias sostenibles, como el aprovechamiento de la energía solar. Estos factores deben considerarse para implementar soluciones bioclimáticas que optimicen el confort térmico y la eficiencia energética en los edificios de la región.

2.2 Técnicas de Adecuación Ambiental

La evolución de la Arquitectura está estrechamente vinculada a la necesidad humana de resguardarse de entornos adversos; este proceso ha dado lugar a ciudades que, mediante la construcción de edificaciones e infraestructuras, han modificado y desplazado el equilibrio natural del ecosistema (Martínez, 2018; Salinas, 2018); como resultado de esta problemática, se han explorado diversas metodologías con el fin de desarrollar edificaciones que se integren de manera armoniosa con su entorno, reduciendo así el impacto ambiental adverso generado con un lenguaje se pueda replicar por profesionistas en la rama de la edificación, pero que también se pueda adaptar a las necesidades puntuales de cada edificio (Alexander, 1971).

(Correal, 2007) aborda la necesidad lingüística en la Arquitectura desde el proceso de diseño arquitectónico, explorando su contexto histórico para comprender el papel del arquitecto y la materialización del proyecto; lo define como un conjunto de prácticas instrumentales para resolver problemas espaciales y de forma, con el fin de elaborar planos técnicos que faciliten la construcción de una obra de manera eficiente y precisa.

En este sentido, comprender los diferentes instrumentos para resolver el proyecto, adaptados al objetivo específico, es fundamental para abordar las diversas características de la Arquitectura, independientemente de estar ligados o no a una metodología particular. A continuación, se exploran diversos intentos de sistematizar las características del lenguaje y las metodologías específicas para abordar las necesidades del proyecto, con el objetivo de representarlas de manera tangible en objetos funcionales.

2.2.1 Sistematización de la Arquitectura

Durante los siglos XVIII y XIX, el proceso de sistematización del lenguaje arquitectónico se llevó a cabo mediante la utilización de tablas comparativas. Por ejemplo, Durand (1760-1834) propuso un método para diseñar y analizar edificios que se centraba en la caracterización de los elementos arquitectónicos a través de la comparación y la clasificación según criterios de economía, funcionalidad y racionalidad (Arribas Castañeyra, 2015).

En el siglo XX, se produjo un cambio significativo en la metodología arquitectónica, marcando un hito en el proceso desde la concepción hasta la realización del proyecto; esto facilitó el desarrollo de nuevas metodologías para la composición de la forma, el espacio arquitectónico y su expresión lingüística (Correal, 2007).

Es pues que teóricos del diseño entre ellos (Alexander, 1971; Alger, 1964; Archer, 1968; Asimow, 1968; Bürdek, 1971), en un esfuerzo por explorar diversos principios para evaluar y comprender la Arquitectura desde diversas áreas del saber, se aproximaron al método científico y crearon enfoques guiados desde distintas disciplinas, con el fin de sistematizar el proceso proyectual y de diseño (Ariza, 1968).

(Alexander, 1971) propone un sistema de análisis que descompone todos los requerimientos y los ramifica con el fin de garantizar la eficacia del diseño a partir del empleo de soluciones funcionales tanto para el desarrollo del proyecto, como para la construcción de este. A este lenguaje sistémico, le llama patrones, los cuales funcionan como instrumentos para limitar el campo de trabajo (Arribas Castañeyra, 2015).

Es relevante destacar el enfoque arquitectónico de su sistema, que subraya la importancia de poner al usuario en el centro del proyecto, centrándose específicamente en sus emociones y respuestas generadas por el espacio arquitectónico (N. A. Salingaros, 2020). Este lenguaje sigue vigente para aquellos cuyo objetivo es crear entornos construidos más adaptables para los seres humanos y reducir el impacto ambiental al mínimo (Jiang, 2019; N. A. Salingaros, 2020).

Serge Chermayeff influenciado por el estudio del lenguaje de Alexander, sostiene que una comunidad ideal se fundamenta en un equilibrio entre la individualidad y la vida social; propone un sistema de umbrales que establece esta armonía a través de jerarquías espaciales, que van desde lo más público hasta lo más privado (Nieto Fernández, 2013). Un par de años después Alexander Klein, propone otro lenguaje sistemático cuyo objetivo principal consistió en definir estrategias para la configuración de viviendas colectivas con el fin de establecer estándares mínimos de calidad para aspectos

como la extensión de la fachada, la profundidad del edificio y las condiciones de ventilación y exposición sola (Arribas Castañeyra, 2015).

La tesis de John Habraken (1928) destaca la importancia de involucrar al usuario de manera activa en el proceso de diseño para identificar los problemas del espacio; propone un sistema de lenguaje arquitectónico que abarca varios componentes: psicológico, técnico, infraestructural, social, económico, procedimental e interdisciplinario. Estos componentes relacionan el objeto arquitectónico con el individuo, considerando aspectos como la relación psicológica entre el hombre y la materia, la producción industrial, la infraestructura urbana, el cambio comunitario, la relación económica entre la ciudad y el edificio, el papel del arquitecto en el proceso y el equilibrio de factores y agentes interdisciplinarios en el diseño y la construcción del espacio.(Nieto Fernández, 2013).

En síntesis, los diversos lenguajes sistematizados han procurado abordar los desafíos del proyecto arquitectónico y su ejecución, con el propósito de estandarizar procesos adaptados a diferentes tipologías de edificios. Los ejemplos mencionados previamente reflejan un esfuerzo por integrar al usuario como un participante activo, así como al espacio y las diversas disciplinas involucradas en su diseño, con el objetivo de encontrar soluciones específicas pero aplicables de manera general a los problemas arquitectónicos.

2.2.3 Arquitectura Bioclimática

Como se mencionó al inicio de este capítulo, los seres humanos han procurado resguardarse de los riesgos externos y ajustarse a diversas condiciones del entorno (Martínez, 2018). En este sentido, se ha investigado la manera de adecuar los edificios con el fin de generar ambientes que favorezcan el bienestar de las personas, teniendo en cuenta aspectos como el clima y el entorno circundante (J. J. Hernández, 2018).

Una estrategia dirigida a abordar este desafío de diseño, que integra elementos de diversos lenguajes sistematizados, es la arquitectura bioclimática, ya que esta busca que la concepción de los edificios se adecúe a las condiciones climáticas locales, al tiempo que aprovecha los recursos naturales disponibles, como la luz solar, la vegetación, la lluvia y los vientos, con el propósito de minimizar el consumo de energía (Barrios, 2019).

En el ámbito del estudio climático, se disponen de diversos instrumentos para caracterizar tanto espacial como temporalmente la superficie terrestre; un ejemplo, representativo es el uso de cartas bioclimáticas, las cuales emplean un diagrama que relaciona la temperatura y la humedad ambiental para definir zonas de confort donde la

mayoría de las personas experimentan bienestar (Da Casa et al., 2019). Entre las cartas bioclimáticas más destacadas se encuentran las elaboradas por Olgyay, (1963), que se utilizan para informar estrategias de diseño en función de las condiciones exteriores, y las de Givoni (1969), que consideran las características físicas del edificio para mitigar los efectos del clima exterior.

Las estrategias de diseño que consideran los distintos aspectos del edificio para abordar problemas climáticos se consideran como control pasivo, ya que implican la aplicación de conocimientos que responden a las variaciones climáticas (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020 p.122), sin embargo, un edificio bioclimático puro implica resolver los desafíos de confort interior a través de un diseño estratégico de la envolvente del edificio, prescindiendo en gran medida del uso de dispositivos tecnológicos; esta meta no es alcanzable sin un análisis climático detallado y puede ser aún más desafiante en climas extremos (Ruiz, 2018). Es aquí donde se identifican las estrategias de control activo, las cuales implican el uso de sistemas de climatización artificial para complementar el comportamiento natural del edificio, aunque no se consideran como la medida principal para controlar el clima (Ozarisoy y Altan, 2021).

Las estrategias bioclimáticas diseñadas para enfrentar altas temperaturas también deben tener en cuenta el nivel de humedad en el interior de los espacios, con el objetivo de garantizar un análisis consistente del confort; en este sentido, las corrientes de aire pueden ser dirigidas a través de cuerpos de agua para aumentar la humedad del aire seco en el interior (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020 p.89).

Por lo tanto, el conocimiento del clima influye en todas las etapas del diseño arquitectónico bioclimático, ya que las decisiones tomadas en relación con varios aspectos de la envolvente del edificio, como su forma, materiales y orientación, entre otros, tendrán un impacto significativo, ya sea positivo o negativo, en su desempeño ambiental y energético una vez que el edificio esté construido (Ruiz, 2018).

2.2.4 Parámetros de Diseño de Edificios Comerciales

Existe una estrecha relación entre las características geométricas de la envolvente del edificio y su eficiencia ambiental y energética, ya que esta superficie es el punto de intercambio de las condiciones termo físicas entre el exterior y el interior, lo que significa que las propiedades de estas superficies influirán en la cantidad de energía que se pierde o se gana (Loukaidou et al., 2017).

Existen estándares locales, nacionales e internacionales que establecen rangos para determinar las condiciones de confort en los espacios, pero no hay parámetros

específicos para evaluar el diseño de la envolvente en una ubicación particular; es pues que, para lograr condiciones ambientales óptimas, el diseño de la envolvente debe incorporar estrategias bioclimáticas que controlen los cambios térmicos y la iluminación, lo que implica abordar el exceso de calor en verano y garantizar una adecuada ventilación, así como minimizar la pérdida de calor en invierno (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020 p.119).

Cada decisión tomada durante la etapa de diseño tendrá un impacto, ya sea positivo o negativo, en el entorno circundante, lo que influirá en la salud y el bienestar de los ocupantes, así como en el consumo de recursos necesarios para su comodidad (McArthur y Powell, 2020).

La cubierta, como parte fundamental de la envolvente del edificio, se encuentra altamente expuesta al medio ambiente y, a menudo, es el único elemento que puede ser transitado. Por lo tanto, debe adaptarse adecuadamente a las condiciones exteriores y cumplir con los parámetros ambientales internos establecidos para el edificio (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020).

Los elementos verticales del edificio, que afectan la iluminación natural, la acústica y la disposición espacial, se examinan desde su composición y grosor hasta su disposición para asegurar condiciones interiores óptimas (Larsen et al., 2020). Por otro lado, las puertas, por su complejidad, requieren consideraciones minuciosas en su diseño y construcción. El marco, como enlace entre el vano y el muro, debe estar sellado para evitar pérdidas o ganancias de calor y ruido, mientras que la hoja debe mantener un espesor adecuado para evitar deformaciones y asegurar su función de separación de espacios (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020).

En otros aspectos a tener en cuenta, la masa de la envolvente puede requerir la utilización de un material moldeable, como el concreto, cuyas características finales estarán estrechamente ligadas al diseño; esto incluye su geometría, textura y la secuencia de construcción, así como las propiedades del material, como su color y maleabilidad, que pueden influir en la textura final del elemento construido (Villazón Godoy y Rodríguez Vargas, 2020).

Según las recomendaciones del (Instituto de Obras Nuevas (New Buildings Institute) [NBI], 2021) para edificios en climas desérticos, se sugiere considerar los siguientes parámetros de diseño:

1. Masa térmica: Se recomienda incorporar en paredes, suelo y/o cubierta, con un espesor de al menos 0.102 m y una superficie expuesta de 1 a 3

veces la superficie del suelo. Se aconseja utilizar ventilación cruzada o de chimenea para enfriar la masa durante la noche.

2. Cubierta: Optar por cubiertas de color claro con una alta reflectancia solar y emitancia térmica, con valores superiores a 0.7, para reducir la ganancia de calor solar en el interior del edificio.
3. Forma: Diseñar el edificio alargado en dirección este-oeste para minimizar la exposición al calor solar y permitir la entrada de corrientes de aire naturales. Se sugiere sombrear las paredes sur y oeste, así como las aberturas acristaladas durante el verano, y complementar con patios o áreas externas sombreadas.
4. Torres de Enfriamiento Evaporativo: Utilizar torres de enfriamiento evaporativo para enfriar el aire exterior y circularlo hacia el interior del edificio. Se recomienda que la altura de la torre sea al menos el doble de la altura interior, con un área transversal de 6 m² para edificios comerciales.
5. Protección Solar: Instalar elementos volados sobre vanos durante los meses de verano para bloquear la luz solar directa y reducir las cargas de refrigeración, con medidas proporcionales a la latitud de la ubicación.
6. Ventilación Cruzada: Colocar aberturas de ventanas perpendiculares a los vientos predominantes y combinadas con aberturas en el lado opuesto del espacio para proporcionar ventilación natural. Se recomienda que las aberturas estén perpendiculares o máximo a $\pm 45^\circ$ desde la dirección de los vientos predominantes, y que la ventana del lado opuesto sea igual o mayor en tamaño a la ventana de entrada de aire.

Técnicas de Adecuación Ambiental

Las técnicas de adecuación ambiental se aplican en edificios de diversas maneras para reducir su impacto ambiental y mejorar su eficiencia energética. Algunas de las prácticas comunes incluyen:

- Diseño pasivo: Incorporar características de diseño que aprovechen al máximo la luz natural, la ventilación natural y el calor solar para reducir la dependencia de la iluminación artificial y los sistemas de calefacción y refrigeración.
- Eficiencia energética: Utilizar materiales y tecnologías que reduzcan el consumo de energía, como aislamientos térmicos de alta calidad, ventanas

de doble o triple vidrio, sistemas de iluminación LED y electrodomésticos eficientes.

- Energías renovables: Instalar sistemas de generación de energía renovable, como paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas o sistemas de energía geotérmica, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Gestión del agua: Implementar dispositivos de ahorro de agua, como grifos y cabezales de ducha de bajo flujo, así como sistemas de recolección y reutilización de agua pluvial para riego y otros usos no potables.
- Materiales sostenibles: Utilizar materiales de construcción ecológicos y de bajo impacto ambiental, como maderas certificadas, pinturas sin compuestos orgánicos volátiles (COV) y materiales reciclados o reciclables.
- Gestión de residuos: Implementar prácticas de reducción, reutilización y reciclaje de residuos durante la construcción y el uso del edificio, así como sistemas de separación de residuos y compostaje.

Incorporar técnicas de diseño bioclimático desde las etapas iniciales del proceso de diseño resulta recomendable para aprovechar los recursos disponibles; sin embargo, combinar el diseño pasivo con tecnología representa un criterio que permite una inversión óptima con beneficios ambientales y energéticos. (Da Casa et al., 2019).

Existen diversas estrategias de diseño para abordar diferentes objetivos en la aplicación en edificios, que pueden dividirse en varias categorías: para calentar el espacio, para retirar calor, de almacenamiento de calor o fresco, y para la transferencia de calor o fresco.

Dentro del diseño pasivo, se incluyen técnicas como las protecciones solares directas horizontales, verticales e indirectas, que regulan la entrada de luz solar; así como incrementar el aislamiento, pues aumenta la resistencia térmica de la envolvente para reducir la transferencia de calor (Bhamare et al., 2020; F. F. Hernández et al., 2017).

Por otra parte, está también la inercia térmica y los ciclos circadianos, que se utilizan para regular la temperatura interna del edificio, permitiendo la salida de calor durante el día y la entrada de aire fresco durante la noche (Ledo Gomis et al., 2021).

La ventilación natural es un método eficaz y sostenible para mejorar la calidad del aire interior y mantener un ambiente cómodo dentro de los edificios y consiste en aprovechar los movimientos naturales del aire, como la convección y la ventilación cruzada, para renovar el aire interior y controlar la temperatura y la humedad. Esta se

implementa mediante la creación de aberturas estratégicas en la parte inferior y superior de los espacios interiores, lo que garantiza una circulación constante de aire fresco y ayuda a eliminar contaminantes y olores no deseados (Ishino et al., 2019).

Por otro lado, la ventilación cruzada implica la entrada de aire fresco desde un lado del edificio y la expulsión de aire caliente desde el otro lado; esto se logra colocando aberturas en las fachadas opuestas, de modo que el aire fresco pueda fluir a través del espacio y el aire caliente pueda salir. Esta técnica es especialmente efectiva en climas donde hay vientos predominantes, ya que aprovecha estos vientos para facilitar el intercambio de aire (Da Casa et al., 2019).

Además, al utilizar recursos naturales y minimizar el uso de equipos mecánicos, la ventilación natural ayuda a reducir la huella de carbono y promueve la sostenibilidad en el diseño y operación de edificios (Ahmed et al., 2021).

2.3 Eficiencia Energética en Edificios Comerciales de Clima Desértico

El avance tecnológico en la búsqueda de mejorar las condiciones de bienestar para los usuarios ha llevado a que se descuide la consideración de la naturaleza y el clima en la construcción, lo que resulta en mayores impactos ambientales (Castillo y Castillo, 2014).

Tras la primera crisis energética en 1973 y la creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles, la atención de los estándares de construcción se centró principalmente en la eficiencia energética, relegando la salud, la seguridad y la comodidad de los ocupantes a un segundo plano (Matic et al., 2017).

Para el año 2021, la demanda mundial de energía ha aumentado significativamente debido al rápido crecimiento urbano, lo que contribuye al calentamiento global debido a la emisión de gases contaminantes en entornos construidos (Pachauri y Meyer, 2019). Este aumento en la demanda energética se ve exacerbado por la falta de soluciones rentables de eficiencia energética en los edificios (Loukaidou et al., 2017).

2.3.1 Consumo Energético de Edificios Comerciales

La eficiencia energética como política pública comenzó a ser impulsada a finales de la década de 1980 (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018). A partir de 2021, la (Comisión Nacional para el Uso de Eficiencia de la Energía [CONUEE], 2018) promueve el uso de tecnologías y combustibles limpios, así como iniciativas para reducir el consumo energético mediante regulaciones y normativas que abarcan desde especificaciones técnicas para equipos hasta el diseño eficiente de la

envolvente de los edificios. Sin embargo, es importante destacar que cumplir con estas características no garantiza un microclima interior adecuado en los edificios (Chatellier Lorentzen y McNeil, 2020).

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad, con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles y la deforestación (Chatterjee y Ghosh, 2021; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021); este aumento de temperatura global ha provocado diversos efectos como el calentamiento de los océanos, la disminución de glaciares, cambios en los patrones de precipitación y un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos como huracanes, olas de calor y sequías (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021).

El sector de la construcción es uno de los principales consumidores de energía y emisores de carbono a nivel mundial (Zou et al., 2021), por lo que muchos países, incluido México, han establecido objetivos para reducir sus emisiones de carbono y lograr la neutralidad de carbono (Chen et al., 2022).

En México, se ha registrado un aumento de temperatura de alrededor de 0.85°C en los últimos 50 años, lo cual está en consonancia con el incremento global reportado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), acorde a (Masson-Delmotte y Zhai, 2019). Se proyecta que para el año 2039, debido a su posición geográfica, el país experimentará temperaturas anuales mayores a 2°C en el norte y entre 1 y 1.5°C en el resto del territorio, acompañadas de una disminución de las precipitaciones entre el 10% y el 20% (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020).

Aunque México tiene uno de los niveles más bajos de emisiones de CO₂ per cápita entre los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), es el onceavo emisor de gases de efecto invernadero (GEI) del mundo debido a su uso intensivo de combustibles fósiles (Castrejon-Campos, 2022), pues a partir del año 2020, el país ocupa el puesto 11 a 13 de los mayores emisores de contaminantes a nivel mundial, siendo responsable del 1.3% del total de emisiones globales (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020).

En el marco del compromiso de México con el Acuerdo de París, se ha establecido la meta de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 22%, así como las emisiones de carbono en un 51%, en comparación con el escenario *business-as-usual*; dado que los edificios son responsables de más de un tercio del consumo total

de energía en el país y emiten una parte significativa de GEI, la descarbonización de la economía se ha convertido en una prioridad a corto y mediano plazo (Banacloche et al., 2020; Yang et al., 2022).

México se posiciona en el onceavo puesto entre las economías más grandes del mundo según el índice de paridad de poder adquisitivo, y es la segunda más grande en América Latina, como se informa en un estudio de la (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024), además, se prevé que para el año 2050, ascenderá al séptimo lugar entre las economías mundiales, según un análisis realizado por (Castro Bernal, 2017). Esto subraya la importancia de optar por un crecimiento económico que minimice las emisiones GEI (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024; Banacloche et al., 2020).

La descarbonización de la economía es un elemento central en la estrategia a corto y mediano plazo de México, ya que busca acelerar la transición energética, promover la inclusión social y fortalecer la resiliencia de las comunidades más vulnerables al cambio climático (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021).

La descarbonización de los edificios desde la perspectiva del consumo energético implica dos enfoques principales: la adopción de fuentes de energía libres de carbono (Johnson, 2010) y/o la reducción del consumo de energía mediante mejoras en la envolvente térmica, así como la implementación de iluminación y equipos más eficientes (Parker, 2009). Estas estrategias pueden aplicarse de manera independiente, aunque su combinación ofrece un mayor beneficio en términos de costo (Timmons et al., 2016).

Es crucial dirigir las estrategias de mitigación hacia la generación y el consumo energético, ya que las medidas de eficiencia energética son fundamentales para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, por ende, las emisiones de carbono (Castrejon-Campos, 2022; Wu et al., 2019; Yang et al., 2022). Además de su impacto en la mitigación del cambio climático, estas medidas suelen generar beneficios sociales y económicos para la sociedad. (Nibedita y Irfan, 2021).

2.3.2 Huella de Carbono

El cambio climático es uno de los problemas más grandes que enfrenta la humanidad ya que derivado de la revolución industrial, la quema de combustibles fósiles ha incrementado, liberando una mayor concentración de diversos Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera, como el dióxido de (CO₂) que en promedio mundial ha alcanzado 411.1 partes por millón (ppm) a partir de noviembre de 2019; además, la

deforestación y otras actividades humanas han causado que al temperatura del planeta se eleve (Chatterjee y Ghosh, 2021; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021).

El sector de la construcción representa gran parte del consumo mundial de energía y emisiones de CO₂ (Zou et al., 2021), por lo que muchos países han establecido objetivos para reducir su pico de carbono y la neutralización de carbono (Chen et al., 2022). México ha tenido un aumento de temperatura de aproximadamente 0.85°C en los últimos 50 años, lo que corresponde con el incremento global reportado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)(Masson-Delmotte y Zhai, 2019).

Por su posición geográfica, la afectación por cambio climático se proyectan para el 2039 con temperaturas anuales mayores a 2°C en el norte del país, y para el resto del territorio podrían oscilar entre 1 y 1.5°C, con disminución de precipitaciones entre 10% y 20% (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020).

Desde el 2020, México se encuentra en la posición 11 a 13 de los países con más emisiones de contaminantes, de los 195 países dentro de la Organización de Naciones Unidas (ONU), al ser responsable de 1.3% del total global, con emisiones per cápita de 3.7 ton, el cual se encuentra por debajo de la media global de 5 ton per cápita, por lo que se encuentra un gran campo de oportunidad para transformar la industria energética y emprender políticas y acciones centradas en la protección y aprovechamiento sostenible de la riqueza natural del país (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020).

Como parte del compromiso del país al Acuerdo de París, la Contribución Determinada a nivel Nacional, representa el mayor nivel de ambición posible para el país acorde a su nivel de desarrollo, ya que se compromete a reducir en 22% las emisiones de GEI (Banaclache et al., 2020).

La descarbonización de la economía define la trayectoria del país a corto y mediano plazo, con el objetivo de acelerar la transición energética con inclusión social y resiliencia de las comunidades más vulnerables al cambio climático (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021). Según datos recabados por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, en México las edificaciones son responsables de: 17% del consumo total de energía, 5% del consumo total de agua, 25% del consumo total de electricidad, 20% de las emisiones de dióxido de carbono, y 20% de

los desechos generados (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2007).

Esto implica para la construcción dos enfoques principales: la adopción de fuentes de energía libres de carbono (Johnson, 2010) y/o la reducir el uso de energía de los edificios a través de mejorar la eficiencia energética de la envolvente, así como la implementación de iluminación y equipos más eficientes (Parker, 2009). Estas estrategias pueden aplicarse de manera independiente, aunque su combinación ofrece un mayor beneficio en términos de costo (Timmons et al., 2016). Estas se pueden aplicar por separado, sin embargo, al combinarlas se obtendrá un mejor costo-beneficio (Timmons et al., 2016).

Una de las principales herramientas regulatorias que se utiliza en México para impulsar la eficiencia energética son las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), ya que son obligatorias y establecen características técnicas para equipos, materiales y especificaciones para espacios interiores (Instituto Mexicano para la Competitividad A.C, 2016), así pues la NOM-024-ENER-2012 establece características térmicas y óptimas para sistemas de acristalamiento en edificaciones (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2012); NOM-030-ENER-2016, para la eficiencia energética mediante lámparas led (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2016); NOM-035-STPS-2018, establece factores de riesgo psicosocial para propiciar el bienestar del trabajador (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2018); y la NOM-025-STPS-2008, establece requerimientos de iluminación que propician un ambiente saludable para los trabajadores (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2015). La implementación de estos requisitos legales ha conducido a cambios hacia la eficiencia energética en la construcción, como el uso de aislamiento térmico adicional y ventanas mejoradas en edificios públicos y residenciales; y, aunque estas medidas han mejorado la eficiencia energética, también han generado condiciones de vida y trabajo insatisfactorias al reducir la ventilación e iluminación natural en los edificios. Otro aspecto conflictivo adicional a tener en cuenta es que, al intentar mejorar la eficiencia energética de la envolvente mediante el aumento de la resistencia térmica de los materiales, también se incrementa la cantidad de carbono incorporado al edificio.

El impacto ambiental de los edificios está impulsado principalmente por la fase operativa, ya que durante esta etapa se genera al menos el 75% de su consumo de energía y el 85% de GEI, sin embargo, hoy en día el enfoque está en el impacto ambiental de los materiales de construcción debido con el fin de tener edificios más sostenibles (Kairies-Alvarado et al., 2021). En respuesta a esta creciente necesidad, se han creado

herramientas como la cuantificación de la huella de carbono y la evaluación del ciclo de vida, cuyo objetivo es minimizar el impacto ambiental de los edificios y fomentar la sostenibilidad en el sector de la construcción (Carrasco-Amador et al., 2022).

2.3.3 Estrategias de Mejora para la Eficiencia Energética (Marco Normativo)

En respuesta a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ mediante el carbono incorporado y operacional, se ha promovido la eficiencia energética a nivel global (Nibedita y Irfan, 2021). El marco normativo asociado a estas estrategias juega un papel crucial al establecer lineamientos legales para garantizar un uso más responsable y eficiente de la energía, especialmente en sectores como la construcción, por lo que es fundamental comprender esta normativa y explorar las estrategias para cumplir con los estándares de eficiencia energética y contribuir a la mitigación del cambio climático.

Nacional

En México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) representan una herramienta regulatoria fundamental para promover la eficiencia energética; estas normativas son de cumplimiento obligatorio y establecen requisitos técnicos para diversos equipos, materiales y especificaciones para espacios interiores (Instituto Mexicano para la Competitividad A.C, 2016).

Por ejemplo, la NOM-024-ENER-2012 define características térmicas óptimas para sistemas de acristalamiento en edificaciones (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2012); mientras que la NOM-030-ENER-2016 aborda la eficiencia energética mediante el uso de lámparas LED (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2016). Además, la NOM-035-STPS-2018 establece factores de riesgo psicosocial para promover el bienestar laboral (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2018); y la NOM-025-STPS-2008 establece requisitos de iluminación para garantizar un entorno saludable para los trabajadores (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2015). También se han establecido objetivos para la producción de electricidad a través de fuentes de energía renovable, con la meta de lograr un 35.1% en 2024, un 38.2% en 2030 y un 50% en 2050 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2020).

El perfil energético y económico de México presenta desafíos y oportunidades debido a su condición como productor y exportador de petróleo, así como por su creciente demanda interna de energía. Aunque ha adoptado legislación climática desde 2012 y ha experimentado un crecimiento en la generación de electricidad renovable, se requiere una acción más contundente en todos los sectores para reducir la dependencia de los

combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024)

Las energías renovables, como los paneles solares, las turbinas eólicas y las presas hidroeléctricas, producen electricidad sin quemar combustibles que emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes; además, gracias a la significativa reducción en los costos de los paneles solares y las turbinas eólicas en los últimos años, las energías renovables ahora se posicionan como la opción más económica para la generación de electricidad nueva en muchas partes del mundo (Zohuri y McDaniel, 2021).

Para el año 2020, la generación de electricidad mediante tecnologías de energía limpia representó el 7% para biocombustibles y el 19% para energías renovables, distribuyéndose en un 84% para el sector residencial y un 16% para el sector no residencial. Esta generación se compone principalmente de energía hidroeléctrica (46%), seguida de energía eólica terrestre (28%), solar fotovoltaica (19.5%) y geotérmica (6.1%) sin embargo, a pesar de estos avances, para el año 2021, México registró 375 millones de toneladas de emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles relacionados con la energía, lo que representa un aumento del 4% con respecto al año 2000 (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024).

Internacional

La construcción a través de certificaciones para la edificación sostenible ha surgido como un atractivo para el sector no residencial, ofreciendo un valor agregado significativo a los edificios, es pues que, sistemas de clasificación como el Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED), pionero en Estados Unidos, junto con certificaciones como WELL (Certificación para el Bienestar) y EDGE (Certificación para la Excelencia en Diseño para Mayores Eficiencias), promueven enfoques holísticos que consideran la eficiencia energética, la calidad ambiental, la adaptación al sitio, el bienestar del usuario y el ahorro de recursos a través de prácticas sostenibles (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], 2024)

Como consecuencia de estas iniciativas, se ha observado un notable aumento a nivel global en el número de edificios certificados, que alcanzó los 92,000 hasta el año 2020. Estos proyectos, algunos ya finalizados y otros aún en construcción, incorporan diversas estrategias de diseño pasivo, sistemas HVAC eficientes y tecnologías inteligentes (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], 2024). Sin embargo, dado que existen diferentes enfoques para obtener la certificación, no siempre se garantiza que un edificio certificado sea energéticamente eficiente (Scofield, 2009), lo

que complica la implementación de una solución integral para la edificación debido a la multiplicidad de factores que influyen en el comportamiento de los edificios (Lumpkin et al., 2020).

2.3.3 Modelos de Consumo Energético en la Edificación

Se requiere una aproximación integral para la mejora energética de los edificios existentes, donde se deben tener en cuenta los efectos energéticos del edificio en su evaluación del ciclo de vida ambiental, con un énfasis en los aspectos que influyen en el consumo de energía (Matic et al., 2017).

El estudio de modelado de consumo energético, tiene hoy en día dos clasificaciones: *top-down* (de arriba hacia abajo) y *bottom-up* (de abajo hacia arriba) (Kavgic et al., 2010; Wu et al., 2019). El primero (*top-down*), hace referencia a los agentes económicos (por ejemplo, sectores productivos, hogares y gobiernos) de manera agregada o representativa que investiga el impacto de las mejoras en la eficiencia energética en la economía (Wu et al., 2019).

Por ejemplo, la mayoría de los modelos *top-down* representan la generación de electricidad como una sola tecnología, sin considerar que la generación eléctrica provenga de diferentes fuentes tecnológicas renovables o no-renovables (Timilsina et al., 2021).

En cambio, la segunda clasificación (enfoque *bottom-up*), investiga el desarrollo de tecnología al analizar de manera sectorial o nivel tecnológico la actividad de producción de energía y la demanda de energía; con técnicas para estimar los impactos de una política energética (Wu et al., 2019).

Una consideración a su favor, es la capacidad de representar a detalle las características físicas y económicas de las tecnologías, pero tienen en contra que ignoran otros aspectos críticos de comportamiento para proyectar la demanda de energía, como la retroalimentación de precios sobre la demanda de productos básicos, los impactos de una política en toda la economía (Timilsina et al., 2021).

Hay otros modelos que se les denomina heridos, ya que combinan ambos enfoques; estos pueden proporcionar análisis integrales para la toma de decisiones políticas (Wu et al., 2019).

El reacondicionamiento energético se trabaja de la mano con programas informáticos dedicados al modelado, simulación y control, con tal éxito que se ha podido general edificios de consumo cero o consumo casi nulo (Santos-Herrero et al., 2021). Estas herramientas tienen un gran potencial con un coste económico relativamente bajo,

debido a los resultados rápidos y confiables en comparación a otros enfoques pasivos (Chong et al., 2021).

Las medidas de reacondicionamiento energético pueden tener efectos opuestos sobre el rendimiento de la calidad ambiental interior ya que pueden desequilibrar dos parámetros básicos; por ejemplo, podrían reducir las ganancias de calor solar y conducir a una mejora en el confort térmico durante la temporada de enfriamiento, pero al mismo tiempo disminuir el confort visual al reducir en el suministro de iluminación natural (Ballarini et al., 2019).

Para obtener estos resultados es necesario la combinación de distintas metodologías arquitectónicas, ambientales y de diseño; ya que con la implementación de estrategias pasivas de arquitectura bioclimática, se puede lograr el mejor comportamiento natural de edificio, pero es necesario alternativas de control mucho más efectivas para garantizar en cualquier panorama ambiental, el confort del usuario (Santos-Herrero et al., 2021).

Las medidas de eficiencia energética para edificios se pueden clasificar en varios tipos, desde medidas de diseño pasivo, hasta el uso de energía renovable, entre las cuales el diseño pasivo es uno de los métodos más fundamentales y eficaces ya que puede disminuir la energía de iluminación y HVAC (Tian et al., 2018).

2.3.4 Integración de Sistemas de Energía Renovable

La integración de sistemas de energía renovable en edificios ha tomado un rol central en el desarrollo de construcciones sostenibles, especialmente en el contexto de los edificios pasivos y de consumo energético casi nulo (nZEB, por sus siglas en inglés) (Santos-Herrero et al., 2021). Estos sistemas no solo reducen la dependencia de fuentes de energía no renovable, sino que también disminuyen significativamente las emisiones de carbono operacional y los costos de operación a largo plazo (Attia, 2018).

La combinación de técnicas de diseño pasivo y la implementación de energías renovables puede llevar a una reducción del consumo de calefacción hasta en un 90% y del consumo energético de enfriamiento hasta en un 50% en comparación con edificios convencionales que se logra con un balance adecuado entre aislamiento, hermeticidad y eficiencia energética en sistemas mecánicos como sistemas de ventilación con recuperación de calor, almacenamiento térmico inteligente y un diseño de envolvente optimizado para minimizar las pérdidas de energía; estas estrategias, cuando se combinan con energías renovables, mejoran aún más la autosuficiencia energética del

edificio y contribuyen a su viabilidad económica y sostenibilidad a largo plazo (Asdrubali y Desideri, 2019).

El diseño y la implementación de energías renovables deben también considerar la calidad del aire interior y la comodidad de los usuarios, ya que, estudios como los de (Ballarini et al., 2019, 2019; Larsen et al., 2020), la integración de fuentes de energía renovable debe realizarse junto con mejoras en la calidad del aire interior. Esto es crucial en regiones no industrializadas, donde la combinación de soluciones de baja tecnología con energías renovables, producidas en colaboración con la industria local, permite crear edificios sostenibles y adaptados a las condiciones específicas de cada región (Attia, 2018).

La integración de sistemas de energía renovable en edificios pasivos o nZEB suele incluir la instalación de paneles solares fotovoltaicos, sistemas solares térmicos para la generación de agua caliente y calefacción, así como bombas de calor geotérmicas, pues, estas tecnologías no solo contribuyen a una reducción significativa en el consumo energético, sino que también resultan esenciales para cumplir con los estándares de alta eficiencia en edificaciones ubicadas en zonas climáticas desafiantes (Zohuri y McDaniel, 2021).

Así pues, la integración de sistemas de energía renovable en edificios pasivos y nZEB representa un avance significativo hacia un futuro de construcción sostenible y resiliente, ya que, este enfoque no solo optimiza el rendimiento energético y reduce los costos operativos a largo plazo, sino que también responde a la necesidad urgente de disminuir el carbono incorporado y operacional.

2.4 Adecuación Ambiental Multiobjetivo

La adecuación ambiental multiobjetivo tiene como un enfoque en el diseño arquitectónico, satisfacer múltiples criterios de rendimiento, tales como eficiencia energética, confort ambiental y sostenibilidad (Chinazzo et al., 2022); el cual es fundamental en el diseño de edificios sostenibles, ya que permite una integración equilibrada de diversos objetivos que contribuyen a la funcionalidad y el impacto ambiental del edificio.

En el contexto de climas desérticos, la adecuación ambiental multiobjetivo se convierte en un reto complejo debido a la necesidad de mantener un balance entre la protección térmica, la eficiencia energética y el confort interior (Barea et al., 2022).

2.4.1 Enfoque Multiobjetivo en la Adecuación Ambiental

En el diseño y análisis de edificios, el enfoque tradicional de prueba y error resulta ineficiente, ya que consume tiempo y recursos sin garantizar resultados óptimos. Para mejorar este proceso, se han desarrollado métodos de análisis más sistemáticos, como el análisis paramétrico y la optimización computacional (Ordoñez Garcia, 2017).

El análisis paramétrico consiste en simular sistemáticamente una o más variables de diseño, variando sus valores para identificar opciones con buen rendimiento, como bajo consumo energético o confort térmico. Este método permite explorar cómo cada variable impacta el desempeño del edificio; sin embargo, el análisis paramétrico suele exigir un alto costo computacional, lo que limita su aplicación a un número reducido de variables y opciones. Además, generalmente aborda un solo objetivo de desempeño, lo cual resulta restrictivo cuando se buscan soluciones equilibradas entre múltiples objetivos, como eficiencia energética y confort (Ordoñez Garcia, 2017).

Para abordar estas limitaciones, se han desarrollado métodos de optimización computacional o basados en simulaciones. A diferencia del análisis paramétrico, la optimización computacional permite explorar de manera eficiente un amplio conjunto de variables y opciones de diseño. Este método utiliza algoritmos avanzados que identifican soluciones óptimas considerando varios objetivos de forma simultánea, lo cual es especialmente útil cuando estos objetivos son divergentes o incluso contradictorios. La optimización computacional aplica criterios matemáticos y simulaciones iterativas para encontrar el conjunto de soluciones que mejor se adapta a las necesidades del proyecto, maximizando el desempeño y la sostenibilidad del diseño (Ordoñez Garcia, 2017).

Una herramienta clave en la optimización computacional es el análisis de Pareto, que permite identificar soluciones que ofrecen un equilibrio entre varios objetivos. Al aplicar el análisis de Pareto en la adecuación ambiental de edificios, es posible identificar combinaciones óptimas de materiales y configuraciones de diseño que minimizan el consumo energético y maximizan el confort térmico, manteniendo un enfoque sostenible. Este análisis también facilita la visualización de las compensaciones necesarias en el diseño. Por ejemplo, el uso de materiales aislantes de alta densidad en la envolvente reduce la transferencia de calor, y el empleo de colores reflectantes en la fachada minimiza la absorción de calor solar, sin comprometer la estética ni la funcionalidad del edificio. Estas estrategias demuestran cómo el análisis de Pareto contribuye a una optimización integral que equilibra los aspectos estéticos, funcionales y sostenibles del diseño arquitectónico.

La optimización multiobjetivo en la envolvente implica el uso de simulaciones avanzadas y algoritmos de optimización (Resende et al., 2020) adaptados según la complejidad del edificio y las variables que se desean analizar. Para apoyar estos procedimientos, organizaciones como ASHRAE han establecido normas que definen los requisitos para el diseño asistido por simulación en edificios no residenciales, permitiendo así cuantificar el impacto de las decisiones de diseño (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares [ANSI], 2021).

Para obtener resultados cercanos al comportamiento del edificio, se requiere información precisa sobre la operación y características de equipos que consuman energía y/o aporten y retiren calor al espacio, ocupación del espacio y sistemas constructivos (Díaz-Torres et al., 2017). Algunos de los principales programas para simulación térmica se enlistan a continuación.

DOE-2: Herramienta gratuita que predice el uso de energía por hora y el costo de energía de un edificio según la información climática horaria, envolvente y sistema HVAC. Fue desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (Coakley et al., 2014).

Energy-Plus: Herramienta avanzada de simulación energética de edificios completos, desarrollada sobre la base del trabajo realizado en DOE-2 por lo que tiene las mismas funciones con mayor detalle, al permitir informe horario y sub-horario, análisis de flujo de aire y amplias especificaciones HVAC (Coakley et al., 2014).

TRNSYS: Programa para simulación de sistemas con una estructura modular que implementa un componente enfoque de simulación para bombas ventiladores o sistemas complejos como edificios multi-zona (Coakley et al., 2014).

ESP-r: Programa de modelado para la simulación del comportamiento térmico, visual y acústico de los edificios, requiere de datos sobre ocupación, envolvente y/o sistemas HVAC para realizar análisis horarios. Además, puede entregar análisis de sensibilidad e incertidumbre inherentes a capacidades (Coakley et al., 2014).

2.4.2 Algoritmos Genéticos.

En este subapartado, se estudia a los algoritmos genéticos (AG) como herramienta clave para la optimización en la investigación aplicada en Arquitectura; en el cual se exploran los fundamentos que respaldan su funcionamiento, así como los diversos elementos y fases involucradas, junto con su aplicación práctica en la resolución de desafíos complejos. A través de esta revisión, se busca ofrecer una comprensión más profunda de esta técnica de optimización y su capacidad para mejorar la eficiencia y

efectividad en la solución de problemas relacionados con el diseño y la construcción de edificaciones.

Basados en la teoría evolutiva de Darwin, los AG imitan procesos de selección natural para optimizar soluciones de diseño (Obitko, 1998). En contextos como el diseño arquitectónico, donde el conjunto de soluciones posibles es amplio y en gran parte desconocido, cada "solución" representa una configuración potencialmente eficiente en términos de consumo energético o confort; así pues, los AG permiten explorar numerosas opciones de diseño en un espacio de búsqueda extenso, evaluando cada una en función de su adecuación a los objetivos de eficiencia y desempeño (Ordoñez Garcia, 2017).

La metodología de optimización en herramientas avanzadas como DesignBuilder, que integra el motor de simulación EnergyPlus junto con el algoritmo genético NSGA-II, facilita el manejo simultáneo de múltiples variables y objetivos complejos por lo que esta combinación permite aplicar el análisis de Pareto para identificar soluciones óptimas, ayudando a seleccionar configuraciones de diseño que optimicen el rendimiento energético y el confort térmico de forma equilibrada. (Ordoñez Garcia, 2017).

El algoritmo NSGA-II se distingue por su rapidez y enfoque de soluciones óptimas, lo cual permite priorizar soluciones bien distribuidas y con alta convergencia, asegurando que los resultados se acerquen efectivamente al frente de Pareto (Ghaderian y Veysi, 2021). La capacidad de DesignBuilder para realizar evaluaciones detalladas y simultáneas de diversas configuraciones arquitectónicas y de eficiencia energética convierte esta metodología en una herramienta robusta para la optimización en edificios sostenibles y de alto rendimiento (Zhang, 2024).

El empleo de algoritmos genéticos y métodos heurísticos en arquitectura facilita la integración de simulación generativa y análisis de elementos finitos, optimizando el diseño arquitectónico según aspectos de geometría, topología y capacidad de adaptación ambiental de la envolvente; lo que permite crear diseños más adaptados a las condiciones del entorno, con mejor rendimiento estructural y sostenibilidad en los proyectos (Onchi, 2021). Además, el uso combinado de herramientas paramétricas y de simulación ambiental permite una exploración de diseño holístico, superando las limitaciones de juicio personal, con un análisis profundo desde las primeras etapas del diseño (Tedeschi y Andreani, 2014)

2.4.3 Optimizaciones en Simulación Dinámica.

El módulo de Optimización de DesignBuilder es una herramienta robusta para optimizar el diseño arquitectónico, pues permite analizar hasta 10 variables de diseño y

combinarlas con hasta 2 objetivos, generando un marco flexible para personalizar el enfoque de optimización y asegurando que las soluciones cumplan con criterios específicos de sostenibilidad o eficiencia energética (Ordoñez Garcia, 2017).

Además, el módulo permite establecer restricciones, lo cual es fundamental para orientar el proceso de optimización hacia soluciones prácticas que respeten las limitaciones del diseño, como parámetros de viabilidad constructiva, eficiencia energética y confort ambiental.

Estas restricciones permiten al diseñador limitar el espacio de búsqueda y evitar configuraciones inviables en la práctica debido a condiciones climáticas específicas, normativas locales o limitaciones de materiales; lo que aumenta la precisión y relevancia de los resultados de simulación al garantizar que las configuraciones cumplan con los objetivos energéticos y se adapten a las realidades constructivas del proyecto y a los criterios de sostenibilidad necesarios para edificios de alto rendimiento (Harshalatha et al., 2024).

Al ejecutar el análisis de optimización, el AG de *DesignBuilder* permite explorar el conjunto de soluciones potenciales, en busca de aquellas configuraciones que mejor cumplan con los objetivos planteados; los resultados se pueden visualizar tanto en una gráfica de dispersión como en una tabla dinámica, en donde la gráfica permite ubicar todas las soluciones simuladas en relación con los valores de los objetivos, pero, sobre todo, permite identificar el grupo de soluciones óptimas (frente de Pareto) (Ordoñez Garcia, 2017).

La optimización mediante el frente de Pareto es una técnica clave en problemas multiobjetivo de diseño arquitectónico y sostenibilidad, que permite seleccionar configuraciones eficientes al balancear objetivos potencialmente conflictivos, como el consumo energético y el confort térmico (Halser et al., 2024). Este método es esencial en la optimización de compensaciones, ya que representa visualmente el conjunto de soluciones no dominadas en problemas multiobjetivo, las soluciones en el frente de Pareto, muestran configuraciones en las que no es posible mejorar un objetivo sin sacrificar otro (Zhang, 2024).

Esto resulta útil cuando se busca optimizar varios criterios conflictivos en la arquitectura sostenible; pues no solo ayuda a identificar las mejores opciones de diseño, sino que también apoya decisiones informadas al resaltar cómo los ajustes en una variable influyen en otras, guiando la elección de la configuración más adecuada para un edificio eficiente y sostenible.

2.4.4 Validación de simulación termo-energética

Las herramientas de modelado energético a menudo se enfrentan a limitaciones de datos de entrada, lo que afecta la precisión de las simulaciones y su capacidad para representar condiciones reales, por lo que la validación de modelos de simulación termo-energética representa un desafío significativo cuando no se dispone de datos de monitoreo ambiental reales; así que para asegurar la precisión de los resultados y su aplicabilidad en contextos reales, es esencial utilizar enfoques metodológicos que complementen la falta de datos empíricos (Hong et al., 2020).

Una estrategia clave para abordar esta falta de datos es la comparación de los resultados obtenidos mediante simulaciones con estándares de referencia reconocidos, como (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE], 2017) y bases de datos de la (Agencia Internacional de Energía [IEA], 2024), así como datos de modelos de referencia previamente validados; lo que proporcionan criterios que permiten verificar la precisión de los modelos de simulación al compararlos con un conjunto de resultados predeterminados antes de ser aplicados a estudios específicos, lo que refuerza su credibilidad y aplicabilidad en la práctica profesional (Pan et al., 2023).

Otra método en la revisión de la literatura, revela que los modelos físicos basados en ecuaciones de balance energético y transferencia de calor pueden ofrecer estimaciones confiables cuando se ajustan a partir de estudios previos y se optimizan con análisis de sensibilidad (Lomas y Eppel, 1992). Por ejemplo, algunos estudios han propuesto el uso de modelos híbridos que combinan simulaciones basadas en física al usar algoritmos de aprendizaje automático entrenados con bases de datos históricas para mejorar la precisión de las simulaciones y ofrecer predicciones más fiables (Hong et al., 2020). Además, la inclusión de simulaciones paramétricas permite explorar múltiples escenarios y evaluar cómo las variaciones en las variables de entrada afectan los resultados de la simulación; lo que contribuye a identificar los parámetros más influyentes y garantiza que el modelo sea robusto ante incertidumbres (Muñoz, 2015).

Los desafíos de estos enfoques incluyen la posibilidad de sesgos en los datos secundarios y la necesidad de una correcta parametrización del modelo, ya que, si los datos de referencia o las variables seleccionadas no son representativas de las condiciones reales del proyecto, los resultados pueden ser inexactos y llevar a decisiones de diseño menos optimizadas; por tanto, se deben establecer criterios rigurosos de selección y ajuste de los datos para garantizar que la información empleada refleje

fielmente las condiciones bajo las cuales se va a evaluar el rendimiento energético del edificio. (Pan et al., 2023).

Finalmente, se puede mencionar que un enfoque integral para la validación de simulaciones termo-energéticas debe incluir la revisión continua de los modelos a través de comparaciones cruzadas y la actualización de los datos de entrada según avances tecnológicos y cambios en los patrones de uso de energía. Esto asegura que las simulaciones sigan siendo útiles y precisas a lo largo del tiempo, manteniendo su relevancia en estudios de sostenibilidad y eficiencia energética en edificios.

Capítulo 3: Metodología

Este capítulo constituye el pilar del estudio, ya que, detalla el enfoque, las características de la investigación, así como los procedimientos y técnicas empleadas para recolectar los datos que responden a las preguntas de investigación y objetivos planteados; por tanto, proporciona una guía estructurada para comprender la rigurosidad y la validez del trabajo investigativo.

3.1 Características de la Investigación

El diseño de investigación plantea sus características a partir del desarrollo metodológico de (Blaxter et al., 2007; R. Hernández et al., 2014; Velázquez Fernández y Rey Cordova, 2007); con estas bases teóricas, y la hipótesis planteada en el capítulo 1, se desarrollaron los subapartados siguientes que exponen a detalle las características de este trabajo de investigación, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Características de la investigación. Elaboración propia

3.1.1 Enfoque de Investigación

El enfoque metodológico de la presente investigación es de tipo mixto ya que acorde con (Creswell y Plano Clark, 2018), estos métodos son una estrategia de investigación o metodología con la cual se recolecta, analiza y mezclan datos cuantitativos y cualitativos en un único estudio, además, se emplean ambos métodos para la recolección de datos y procedimientos de análisis e inferencias.

Los datos de cada variable se representan por medio de magnitudes y serán analizados mediante estadística, para así, estimar su potencial energético-ambiental y cumplir con el objetivo de investigación 3: estimar el potencial energético y ambiental de técnicas de adecuación ambiental multiobjetivo para edificios comerciales en clima desértico muy seco.

Además, la parte cualitativa de la investigación se reflejará mediante aplicaciones de encuestas a los usuarios del edificio, pues al conocer la percepción sobre las condiciones de calidad ambiental interior de edificios comerciales se identifican los problemas y permitirá proponer soluciones puntuales.

3.1.2 Tipo Investigación

La investigación es de tipo cuasiexperimental, ya que, acorde a (R. Hernández et al., 2014), se busca observar el efecto de las técnicas de adecuación ambiental (variable independiente) sobre la eficiencia energética, carbono incorporado y confort térmico (variables dependientes) de edificios comerciales (unidad de análisis).

Por otra parte, (Velázquez Fernández y Rey Cordova, 2007), establecen que una característica importante para este tipo de investigación es que, la formación de los grupos no se realiza al azar porque ya están formados antes de la investigación. Es pues, que esta selección de grupos se puede consultar en el subapartado 3.2.2 Técnicas de Adecuación.

3.1.3 Variables de Estudio

Acorde a (Velázquez Fernández y Rey Cordova, 2007), las variables son aquellas que se consideran supuestas causas, es decir, la condición que antecede en una relación entre variables. En particular, para esta investigación, el cuasiexperimento se conformó por tres variables dependientes: (1) eficiencia energética, (2) carbono incorporado y (3) confort térmico, mismas que toman como objetivos para la simulación multiobjetivo; además, se empleó un conjunto de variables independientes denominado Técnicas de Adecuación Ambiental; las cuales, se describen a continuación:

Se identificó como variable dependiente 1, se utilizó para evaluar el impacto de las variables independientes sobre el comportamiento de la carga interna y externa en la unidad de análisis. El objetivo principal de esta variable fue reducir el consumo energético mediante un análisis detallado de la demanda y el consumo energético del edificio. Para ello, se realizaron mediciones de consumo energético, que luego se compararon con los datos de facturación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), permitiendo verificar la efectividad de las estrategias implementadas.

Tabla 2. Alcance de variables para eficiencia energética

Fuente	Variable por medir	Unidad
Carga interna	Ocupación	met
	Equipo	kWh
	Iluminación	kWh
Carga externa	Ganancias de calor envolvente	kWh

La variable dependiente 2, carbono incorporado, se centró en calcular la cantidad de carbono incorporado generadas por cada sistema constructivo. Para cada combinación de materiales, se estimó el carbono incorporado, expresado en kilogramos de CO₂ equivalente por kilogramo de material (kgCO₂/kg). Esta métrica permite evaluar el impacto ambiental de los materiales usados en términos de dióxido de carbono equivalente, para una perspectiva integral sobre la sostenibilidad de los sistemas constructivos.

Este análisis permite comprender la contribución específica de cada material al carbono incorporado total en los sistemas constructivos, sirviendo de guía para la selección de materiales que minimicen el impacto ambiental en la construcción de edificios comerciales en climas desérticos.

Tabla 3. Variables y valores de carbono incorporado para materiales

Material	Espesor	Carbono incorporado (kgCO ₂ /kg)	Fuente
Bloque relleno parcial	0.150	2.55	ICE v1 2011
Cartón de yeso 125 kg/cm ³	0.013	0.38	ICE v1 2011
Concreto armado 2% acero	0.100	0.23	ICE v1 2011
Ladrillo cocido	0.140	0.23	icev1.6
Lamina steel	0.009	6.15	icev1.6
Mortero cemento-arena	0.010	0.21	ICE v1 2011
Pintura elastomérica flexible	0.003	2.42	ICE v1 2011
Estructura metálica con fibra de vidrio en rollo	0.076	7.50	ICE v1.6
Poliuretano expandido	0.051	2.55	ICE v1 2011
Thermorock 4-1/4 Reforzado	0.108	3.85	Estimación ICE v1 2011
Loseta cerámica	0.010	0.65	ICE v1.6
Vigueta casetón	0.170	2.93	Estimación ice v1

Estructura metálica y hoja de yeso	0.120	8.21	Estimación ICE v1 2011
Yeso	0.010	0.12	ICE v1 2011
Piso de concreto armado 2% acero	0.120	0.68	ICE v1 2011

Se consideró como variable dependiente 3, al confort térmico interior, en que se evaluó para determinar el efecto de las condiciones ambientales internas dentro de rangos específicos, orientados a edificios comerciales. Este análisis se enfocó en la temperatura de bulbo seco (TBS) y la humedad relativa (HR), ambos factores clave para asegurar el bienestar y confort de los ocupantes.

Los rangos de cumplimiento establecidos para cada uno de estos parámetros están detallados en la Tabla 13 del subapartado 3.3 Evaluación Ambiental. Estos indicadores permiten evaluar el nivel de confort higrotérmico, proporcionando datos que ayudan a identificar y ajustar las condiciones de ventilación y climatización necesarias.

. Tabla 4. Variables para variable dependiente 3

Confort	Variable por medir	Unidad
Higrotérmico	Temperatura de Bulbo Seco	°C
	Humedad Relativa	%

Por otra parte, la variable independiente se conformó por un conjunto de Técnicas de Adecuación Ambiental (TAA) dividido en tres grupos de análisis: el primero relacionado a la masa térmica de la envolvente del edificio, para medir su potencial ambiental y energético sobre muros (M) y cubierta (C); se compone de 69 combinaciones de sistemas constructivos (SC) cuyos resultados permitirán estimar su impacto en el consumo energético del edificio. En la Figura 3, se muestran los SC aplicados a la envolvente.

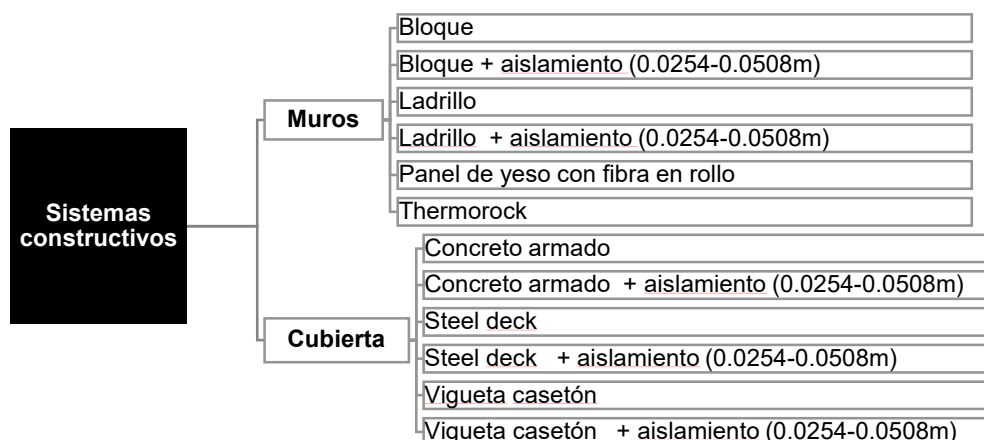


Figura 3. Diagrama de sistemas constructivos evaluados. Elaboración propia

Cada sistema constructivo se programó acorde a distintas capas de materiales que conforman el sistema constructivo (SC), con la capa exterior e interior en el mismo acabado, las propiedades de cada material se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Materiales y propiedades térmicas

Material	Espesor en capa	Conductividad (W/m-K)	Calor específico (J/kg-K)	Densidad (kg/m³)	R	Fuente
Bloque relleno parcial	0.150	1.060	837	1664	-	CATEDI
Carton de yeso 1125 kg/cm³	0.013	0.400	1125	1000	0.39	Estimación R_U
Concreto armado 2% acero	0.100	2.500	1000	2500	-	HTFlux
Ladrillo cocido	0.140	0.722	837	1920	-	CATEDI
Lamina steel	0.009	50.00	450	7800	-	HTFlux
Mortero cemento-arena	0.010	0.722	837	1856	-	CATEDI
Pintura elastomérica flexible	0.002	0.050	1500	70	-	ISO 10456
Estructura metálica con fibra de vidrio en rollo R19	0.076	-			0.55	Estimación R_U
Poliuretano expandido, 28.8 kg/m³	0.0254-0.0508	0.035	1213	28.8	-	DOE
Thermorock 4-1/4 Reforzado	0.108	0.045	880	215	-	Estimación R_U
Loseta cerámica	0.010	1.300	840	2300	-	ISO 10456
Vigüeta casetón	0.170	0.210	1207	794	-	CATEDI
Estructura metálica y hoja de yeso	0.120	-			1.17	Estimación R_U
Yeso	0.010	0.231	837	720	-	CATEDI
Piso de concreto armado 2% acero	0.120	2.500	1000	2400	-	CATEDI

La unidad de análisis está representada por edificios comerciales delimitados por: clasificación climática, acorde a Köppen-Geiger; territorial, es decir, que se encuentre dentro del área urbana; área, volumen y giro comercial acorde a información consultada en el Reglamento de Edificaciones de Mexicali (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2005); así como de ciertas características espaciales, derivadas de una entrevista con una agente de Bienes Raíces de Mexicali. Las especificaciones para cada parámetro que describe la unidad de análisis, se muestran en la Tabla 6, a continuación:

Tabla 6. Cédula de características sobre unidad de análisis

Parámetro	Componente	Especificación
Tipología	2.1.2 Comercio 2.1.3 Comercio alimenticio	
Escala	Pequeña escala	Menor a 250 m²
Espacialidad	Edificio de 1 nivel	Altura máxima 8 m
	Fachada	Con 1 o 2 fachadas principales
	Forma regular	Sin elementos verticales curvos o con ángulos diferentes a 90°
	Muros divisorios mínimos	Únicamente para diferenciar zonas de trabajo o sanitarias

Fuente: Elaboración propia

El cuasiexperimento se estudió desde el enfoque teórico de la simulación dinámica multiobjetivo, que, a través de distintos programas tanto de simulación dinámica, como de manejo de datos ambientales, permitieron evaluar 69 técnicas de adecuación ambiental (mostradas en la Figura 3) para seleccionar aquellas con mejor potencial energético y ambiental, las cuales se denominaron Técnicas de Adecuación Ambiental Multiobjetivo.

3.1.4 Periodicidad

El estudio se clasificó como transversal, debido a que se sitúa en un punto determinado del tiempo (Velázquez Fernández y Rey Cordova, 2007); este tiempo tiene como referencia dos estaciones del año (verano e invierno) pues son críticas para climas “desértico cálido” según la clasificación de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), debido a la necesidad de utilizar aparatos de climatización artificial.

Además, esta delimitación temporal consideró un ciclo anual, incluyendo las transiciones entre verano e invierno, para llevar a cabo el análisis mediante la simulación multiobjetivo de las Técnicas de Adecuación Ambiental (TAA).

Esta aproximación permitió establecer correlaciones y explicar las variables de estudio, así como determinar el grado de asociación y conexión que guardan con la eficiencia energética y el carbono incorporado, con el fin de describir el potencial energético-ambiental de cada TAA.

3.2 Adecuación Ambiental

Los parámetros geométricos de la envolvente de un edificio, como su diseño, dimensiones, materialidad y orientación, juegan un papel crucial en su rendimiento energético y ambiental, ya que afectan directamente la cantidad de energía perdida o ganada en su interior (Loukaidou et al., 2017).

Para este trabajo, se evaluó un conjunto de Técnica de Adecuación Ambiental (TAA) en edificios comerciales situados en Mexicali, Baja California, de clima desértico muy seco; la delimitación geográfica, así como la variable independiente y su población de estudio, se describen a continuación:

3.2.1 Diagnóstico Bioclimático

La clasificación climática de Köppen-Geiger define a Mexicali como un área de clima desértico cálido (BWh), caracterizada por temperaturas extremadamente altas en verano, inviernos templados, y precipitaciones anuales mínimas (Kottek et al., 2006). Estas condiciones climáticas representan desafíos únicos y oportunidades específicas para el diseño y la construcción sostenible en la región, destacando la importancia de

estrategias arquitectónicas que aborden la eficiencia energética y el confort térmico en un entorno desértico.

Para el estudio de ambiental, se utilizaron datos recopilados por la estación climática No. 722810, ubicada en Imperial, California y procesados con el programa *ClimateConsultant*® y hojas de cálculo de confort ANSI-ASHRAE desarrollada por (Luna-León, 2020). Dicha estación fue seleccionada debido a que su archivo climático está validado por una red de estaciones meteorológicas a nivel mundial y se encuentra en la proximidad más cercana al área de estudio, a tan solo 33 kilómetros de Mexicali, y dentro de un entorno urbano similar.

Para analizar el comportamiento termo-energético de los edificios comerciales en un clima desértico, es fundamental evaluar los parámetros ambientales locales, específicamente la temperatura de bulbo seco, la temperatura del suelo y la humedad relativa promedio, factores que influyen significativamente en la demanda energética y en el confort térmico de las edificaciones, especialmente en regiones con variaciones extremas de temperatura a lo largo del año, como Mexicali, Baja California. La Tabla 7 presenta un resumen de estos parámetros mensuales, como una base para comprender las condiciones climáticas que afectan en la región.

Tabla 7. Condición climática del caso de estudio

Mes	Promedio de temperatura de bulbo seco (°c)			Temperatura de SUELO (°C)	Promedio de humedad relativa (%)		
	MIN.	PROM.	MAX.		MIN.	PROM.	MAX.
ENERO	2.2	14.0	28.7	20.6	21	42	59
FEBRERO	4.5	14.7	29.5	18.6	24	47	71
MARZO	5.6	19.0	33.2	17.8	19	40	46
ABRIL	8.4	21.2	35.5	18.6	24	30	59
MAYO	12.1	26.0	41.3	20.6	21	38	55
JUNIO	16.3	29.8	41.2	23.3	15	29	49
JULIO	23	33.1	47.2	26	13	39	60
AGOSTO	22.1	33.8	45.4	28	19	33	48
SEPTIEMBRE	18.9	31.0	44.5	28.8	16	24	66
OCTUBRE	12.9	24.5	39.5	28	21	31	61
NOVIEMBRE	5.8	18.1	32.8	26	23	37	68
DICIEMBRE	2.1	13.0	27.7	23.3	16	33	62

Elaboración a partir de estación climática No. 722810

Según estos datos, se estimó que la temperatura media anual de bulbo seco (TBS) es de 23.2°C, con una TBS promedio del mes más frío de 13.0°C. En la muestran las TBS promedio máximas y mínimas para días máximos, típicos y mínimos. Se observa que julio es el mes más caluroso del año, con una TBS promedio que varía entre 23.0°C y

47.2°C, mientras que diciembre es el mes más frío, con una oscilación de TBS promedio entre 2.1°C y 27.7°C.

Tabla 8 se muestran las TBS promedio máximas y mínimas para días máximos, típicos y mínimos. Se observa que julio es el mes más caluroso del año, con una TBS promedio que varía entre 23.0°C y 47.2°C, mientras que diciembre es el mes más frío, con una oscilación de TBS promedio entre 2.1°C y 27.7°C.

Tabla 8. Temperatura de bulbo seco promedio en Mexicali, Baja California

Días de máximas Temperatura				Días típicos Temperatura				Días de mínimas Temperatura			
DÍA	MAX	MED	MIN	DÍA	MAX	MED	MIN	DÍA	MAX	MED	MIN
31-ene	28.7	19.8	11.0	17-ene	22.4	14.0	6.6	12-ene	15.2	8.1	2.2
22-feb	29.5	20.1	11.6	5-feb	22.0	14.7	8.3	14-feb	16.7	10.4	4.5
17-mar	33.2	24.6	16.9	15-mar	27.2	19.0	11.6	8-mar	18.7	12.1	5.6
11-abr	35.5	27.1	19.5	23-abr	29.3	21.2	13.2	3-abr	22.0	15.0	8.4
28-may	41.3	32.6	23.5	2-may	34.9	26.0	17.3	12-may	26.5	19.2	12.1
19-jun	41.2	35.4	30.1	29-jun	38.5	29.8	20.6	4-jun	32.0	24.3	16.3
21-jul	47.2	38.2	29.0	17-jul	40.5	33.1	25.2	15-jul	36.6	30.0	23.0
19-ago	45.4	37.0	28.5	21-ago	41.3	33.8	26.9	4-ago	37.2	29.7	22.1
4-sep	44.5	35.9	27.4	21-sep	39.8	31.0	22.9	11-sep	31.1	24.1	18.9
11-oct	39.5	30.9	23.3	18-oct	33.5	24.5	16.7	28-oct	22.3	17.3	12.9
11-nov	32.8	23.4	15.0	16-nov	25.9	18.1	11.1	1-nov	16.3	11.0	5.8
18-dic	27.7	18.2	10.3	10-dic	21.8	13.0	6.1	25-dic	16.7	8.7	2.1

Elaboración a partir de estación climática No. 722810

La Humedad Relativa (HR) promedio anual, se estimó en 35.2%, sin embargo, en el mes más caliente, oscila entre 13-60%, con una HR del día típico de 38.5%; en cuanto al mes más frío, oscila entre 16-62%, con una HR del día típico de 32.9%. Estos datos, se pueden observar en la Tabla 9:

Tabla 9. Humedad Relativa promedio en Mexicali, Baja California

Días de máximas Humedad relativa				Días típicos Humedad relativa				Días de mínimas Humedad relativa			
DÍA	MAX	MED	MIN	DÍA	MAX	MED	MIN	DÍA	MAX	MED	MIN
31-ene	59.0	35.6	17.0	17-ene	67.0	42.4	20.0	12-ene	68.0	43.5	21.0
22-feb	71.0	42.4	19.0	5-feb	75.0	46.8	27.0	14-feb	70.0	47.0	24.0
17-mar	46.0	29.1	14.0	15-mar	64.0	40.0	20.0	8-mar	52.0	35.6	19.0
11-abr	59.0	33.6	15.0	23-abr	47.0	30.0	13.0	3-abr	73.0	48.6	24.0
28-may	55.0	32.7	16.0	2-may	66.0	38.0	17.0	12-may	57.0	38.5	21.0
19-jun	49.0	32.0	20.0	29-jun	48.0	28.8	12.0	4-jun	51.0	29.2	15.0
21-jul	60.0	33.8	17.0	17-jul	56.0	38.5	23.0	15-jul	38.0	22.8	13.0
19-ago	48.0	32.7	19.0	21-ago	53.0	33.1	19.0	4-ago	63.0	39.3	19.0
4-sep	66.0	38.5	19.0	21-sep	41.0	23.8	11.0	11-sep	43.0	29.5	16.0
11-oct	61.0	36.2	18.0	18-oct	48.0	31.0	16.0	28-oct	52.0	38.0	21.0

11-nov	68.0	40.4	18.0	16-nov	52.0	37.4	18.0	1-nov	60.0	38.6	23.0
18-dic	62.0	37.6	16.0	10-dic	48.0	32.9	14.0	25-dic	59.0	35.7	16.0

Elaboración a partir de estación climática No. 722810

La combinación de temperaturas extremas en verano, humedad relativa variable y baja precipitación anual plantea retos significativos para el diseño de edificios en climas desérticos cálidos. Estos factores subrayan la necesidad de adoptar estrategias de eficiencia energética y confort térmico que respondan a las demandas específicas de esta región. Los datos de temperatura y humedad relativa presentados en las tablas permiten identificar patrones anuales, esenciales para orientar las decisiones de diseño y construcción hacia soluciones sostenibles y adaptadas al entorno.

3.2.2 Técnicas de Adecuación Ambiental

El ambiente higrotérmico juega un papel importante para el confort del usuario, por lo que interpretar las características ambientales en diferentes temporadas del año permite entender cuando se requiere de calentamiento o enfriamiento en el edificio (Sánchez-López, 2022).

Una carta psicrométrica es un gráfico que muestra las relaciones de diferentes propiedades del aire, tales como: Temperatura de Bulbo Seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo, Humedad Relativa (HR), punto de rocío, relación de humedad, calor total (entalpía) y volumen específico; su función principal, es determinar cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad del aire (Sánchez-López, 2022).

Por consiguiente, elaborar una carta adaptada a las condiciones climáticas específicas posibilitará la identificación de las estrategias de control bioclimático apropiadas acorde al objetivo a solucionar en el edificio. En la Figura 4 se presenta la carta psicrométrica derivada de los datos recabados de la estación climática No. 722810, detallada en el subapartado 3.2.1 Diagnóstico Bioclimático, en la que se observa que las Técnicas de Adecuación Ambiental (TAA) se enfocan en el enfriamiento del espacio interior acorde al análisis climático.

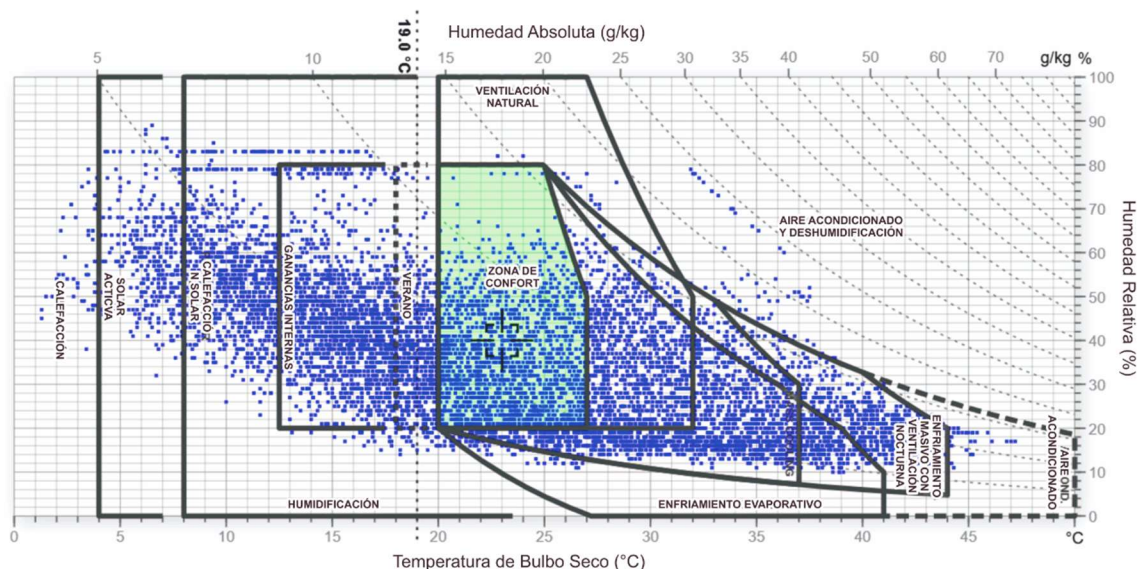


Figura 4. Carta psicrométrica para Mexicali, Baja California

Debido a esto, el primer grupo de análisis de la TAA relacionado con la masa térmica de la envolvente del edificio, pero enfocado en muros y cubiertas, se constituye de diversos sistemas constructivos: la base para los SC de muros es (1) bloque de concreto relleno parcial, (2) ladrillo de barro cocido, (3) estructura metálica ligera rellana con fibra de vidrio en rollo R25, panel de yeso con fibra exterior y panel de yeso interior, así como de (4) thermorock 4-1/4 reforzado con acero; la base para los SC de cubierta es (1) losa de concreto armado con 2% de acero, (2) losa de Steel Deck, y (3) losa de vigueta y casetón de poliestireno.

Además, para los SC de bloque de concreto, ladrillo de barro, losa de concreto, Steel Deck y vigueta casetón se añaden variaciones con 0.0254 m y 0.0508 m de aislamiento (EPS); el listado de SC se pueden consultar Tabla 10, mientras que, en la Tabla 5 se desglosan las distintas propiedades de cada material junto con sus propiedades como resistencia térmica y espesor, en la además, es importante destacar que los materiales del resto de los componentes de la envolvente como puertas, piso, plafón y ventanas permanecen constantes en cada combinación de sistema constructivo.

Tabla 10. Propiedades térmicas de sistemas constructivos en la envolvente.

Clave		Sistemas constructivos	Espesor (m)
MURO	BC0	Bloque concreto (15 mm emplaste cemento-arena, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	0.17
	BC1	Bloque concreto + 0.0254 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 25.4 mm poliuretano expandido, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	0.20

	BC2	Bloque relleno parcial + 0.0508 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 50.8 mm poliuretano expandido, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	0.22
	LB0	Ladrillo de barro cocido (15 mm emplaste cemento-arena, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	0.16
	LB1	Ladrillo de barro cocido + 0.0254 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 25.4 mm poliuretano expandido, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	0.19
	LB2	Ladrillo de barro cocido + 0.0508 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 50.8 mm poliuretano expandido, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	0.21
	NOM	Valor U para Mexicali, proporcionado por la NOM-021-ENER-2011	-
	PEM	Panel de yeso y estructura metálica (15 mm emplaste cemento-arena, panel de yeso y estructura metálica de 108 mm rellenos con manta de fibra de vidrio (R25), 19 mm de yeso)	0.12
	THK	Panel de fibrocemento y estructura (15 mm emplaste cemento-arena, panel de fibrocemento y estructura de acero de 4-1/4", 19 mm de yeso)	0.13
CUBIERTA	LC0	Losa de concreto (3 mm de pintura elastomérica, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	0.11
	LC1	Losa de concreto + 0.0254 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 25.4 mm de poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	0.14
	LC2	Losa de concreto + 0.0508 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 50.8 mm de poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	0.16
	NOM	Valor U para Mexicali, proporcionado por la NOM-021-ENER-2011	-
	SD0	Steel Deck (3 mm de pintura elastomérica, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	0.11
	SD1	Steel Deck + 0.0254 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 25.4 mm poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	0.14
	SD2	Steel Deck + 0.0508 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 50.8 mm poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	0.16
	VC0	Vigueta y casetón (15 mm cemento-arena, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.19
	VC1	Vigueta y casetón + 0.0254 m EXP (15 mm cemento-arena, 25.4 mm poliestireno expandido, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.22
	VC2	Vigueta y casetón + 0.0508 m EXP (15 mm cemento-arena, 50.8 mm poliestireno expandido, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.24

Fuente: Elaboración propia

El objetivo para este grupo de TAA fue de mejorar la resistencia térmica; para la variable que respecta a los vanos, además de los objetivos anteriores, se buscó el mejor diseño y relación vano-muro (WWR). Además, se buscó cumplir con la NMX-AA-164-SCF1-2013, NOM-025-STPS-2008, NOM-008-ENER-2001, NOM-025-SENER, así como con el código de energía de California y otras normas internacionales como ASHRAE; más información de estas normas se puede consultar el capítulo 2.

El uso de TAA en edificios comerciales de climas desérticos permite abordar de manera efectiva las demandas de confort térmico e incrementar la eficiencia energética. Además, al considerar las normas y estándares nacionales e internacionales, se garantiza que el diseño no solo responda a las condiciones climáticas locales, sino que también cumpla con los requisitos de calidad y sostenibilidad, por lo que este enfoque contribuye a la creación de espacios habitables y sostenibles, optimizando el uso de recursos y reduciendo el impacto ambiental.

3.3 Evaluación Ambiental

Los estudios llevados a cabo en el ámbito de la calidad del ambiente interior, junto con la comprensión de las interacciones entre sus diversos elementos, han permitido establecer límites y caracterizar cómo influyen en la salud y el bienestar de las personas (Tham, 2016).

Estos límites se comparan con los estándares de IEQ para crear una escala de evaluación de estos aspectos, especialmente adaptada para edificaciones comerciales; con base en lo anterior, para este estudio se utilizaron rangos de condiciones de IEQ y eficiencia energética para mejorar, a través de la simulación multiobjetivo, las estrategias de adaptación ambiental aplicadas a edificios comerciales.

3.3.1 Eficiencia Energética

El consumo de energía de un edificio está influenciado por varios factores, como el clima local, el diseño arquitectónico, la calidad de los materiales y procesos de construcción, así como la gestión y el uso de la energía, entre otros. Por lo tanto, para evaluar el potencial energético, se examinó la contribución de la carga externa e interna de calor del edificio, representada en kilovatios-hora (kWh). Esto permitió analizar el consumo de energía del edificio, lo que se traduce en el costo reflejado en una factura de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en pesos mexicanos.

En lo que respecta a carga externa, la orientación del edificio y diseño de envolvente junto con la posición y dimensión de vanos, son factores necesarios a considerar para mediar la climatización interior (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, 2012). Por lo tanto, los resultados obtenidos del análisis térmico de la envolvente se evaluaron desde una perspectiva energética para determinar qué técnica de adaptación ambiental ofrece un mejor rendimiento térmico, lo que resultaría en un menor uso de sistemas de climatización.

La carga interna de un edificio se compone de equipos, iluminación y ocupación, como se detalla en el subapartado 2.3; de los mayores desafíos para calcular el consumo energético total de un edificio es el equipo eléctrico, que puede representar hasta el 40% del consumo total de energía (Doherty y Trenbath, 2019). La ocupación del edificio también es un factor desafiante, ya que el número de personas y su actividad física pueden aumentar la temperatura del espacio. Además, las acciones individuales de los usuarios, como abrir y cerrar ventanas y ajustar los sistemas de climatización, también pueden afectar el microclima interior (Szczurek et al., 2016).

Es pues que, para la toma de datos y clasificación de espacios, se tomaron en cuenta todas las actividades, requisitos y condiciones; que por medio de encuestas y observación en sitio se clasificaron las zonas con ocupación y sin ocupación para lograr caracterizar patrones de comportamiento con efecto significativamente en el uso de energía.

3.3.2 Costo energético

El análisis del consumo energético y su conversión en costos es fundamental para evaluar la viabilidad económica de las estrategias de adecuación ambiental en edificios comerciales. Este subapartado aborda la metodología para la conversión del consumo energético, obtenido de las simulaciones dinámicas, en costos monetarios.

La estimación del costo energético se realizó utilizando la tarifa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) denominada Pequeña Demanda Baja Tensión (PDBT), aplicable a edificios con un consumo energético de hasta 25 kWh. Esta tarifa se caracteriza por tener variaciones mensuales en los costos, las cuales se publican de manera oficial por la CFE y reflejan las condiciones específicas de cada periodo, que incluye:

- **Transmisión:** Este cargo corresponde al uso de la infraestructura de la red de transmisión que transporta la energía desde los centros de generación hasta las redes de distribución. Se calcula en base al consumo en kilovatios-hora (kWh) y se expresa en \$/kWh.
- **Distribución:** Involucra el costo asociado a la distribución de energía eléctrica desde las subestaciones hasta los usuarios finales. Este cargo se expresa en \$/kW y varía en función de la demanda de energía del usuario.
- **Operación del CENACE (Centro Nacional de Control de Energía):** Este componente incluye el costo de las actividades de operación y control del

sistema eléctrico nacional. Se cobra en \$/kWh y refleja la supervisión y gestión de la red eléctrica para garantizar un suministro confiable.

- Operación del Suministro Básico: Se refiere a los costos asociados con la gestión administrativa y operativa de la empresa suministradora (en este caso, CFE Suministrador de Servicios Básicos). Se muestra en \$/mes y representa un costo fijo.
- Servicios Convexos no MEM (Mercado Eléctrico Mayorista): Estos cargos están relacionados con servicios adicionales necesarios para garantizar la calidad y estabilidad del suministro eléctrico, como el control de la frecuencia y la tensión. Se presentan en \$/kWh.
- Energía: Este es el cargo principal que se cobra por el consumo de energía eléctrica y se calcula en función de la cantidad de energía consumida, expresado en \$/kWh. Este costo puede variar dependiendo del horario de consumo (pico o fuera de pico) y la temporada.
- Capacidad: Representa el cargo por la demanda máxima registrada por el usuario en un periodo determinado y se cobra en \$/kW. Este costo refleja la infraestructura requerida para atender la máxima demanda de energía del usuario.

Estos cargos se suman para determinar el costo total de la energía eléctrica que debe pagar un usuario bajo la tarifa PDBT, que incluye variaciones mensuales y costos diferenciados por temporada (pico y fuera de pico), lo que influye directamente en los gastos energéticos del proyecto.

Tabla 11. Variaciones de costos energéticos para PDBT en 2023

Mes	Transmisión \$/kWh Base	Distribución \$/kW	Operación CENACE \$/kW h Base	Operación del suministrador básico \$/mes	Servicios Convexos no MEM \$/kWh Base	Energía \$/kWh Base	Capacidad \$/kW	Cargo fijo \$	Cargo variable \$
Enero	\$0.18	\$0.69	\$0.01	\$59.85	\$0.01	\$0.63	\$0.95	\$59.85	\$2.47
Febrero				\$59.85		\$0.68	\$1.02	\$59.85	\$2.58
Marzo				\$59.85		\$0.65	\$0.98	\$59.85	\$2.51
Abril				\$59.85		\$0.66	\$1.00	\$59.85	\$2.53
Mayo				\$59.85		\$0.67	\$1.02	\$59.85	\$2.58
Junio				\$59.85		\$0.69	\$1.04	\$59.85	\$2.60

Julio				\$59.85		\$0.69	\$1.05	\$59.85	\$2.63
Agosto				\$59.85		\$0.69	\$1.04	\$59.85	\$2.61
Septiembre				\$59.85		\$0.68	\$1.03	\$59.85	\$2.59
Octubre				\$59.85		\$0.68	\$1.03	\$59.85	\$2.60
Noviembre				\$59.85		\$0.67	\$1.02	\$59.85	\$2.57
Diciembre				\$59.85		\$0.67	\$1.01	\$59.85	\$2.56

Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2024)

Los detalles y variaciones de cada uno de estos componentes pueden consultarse en la página oficial de la CFE y sus actualizaciones mensuales (Comisión Federal de Electricidad, 2024). El cálculo del costo energético se efectuó aplicando la fórmula general:

$$\begin{aligned} \text{Costo Energético Total} = & (\text{Consumo Energético en kWh} \times \\ & \text{Tarifa de Energía en \$/kWh}) + (\text{Demanda Máxima en kW} \times \text{Tarifa de Capacidad en \$/kW}) \\ & + \text{Cargo Fijo} + (\text{Consumo Energético en kWh} \times \text{Tarifa de Transmisión en \$/kWh}) + \\ & (\text{Demanda en kW} \times \text{Tarifa de Distribución en \$/kW}) + (\text{Consumo Energético en kWh} \times \\ & \text{Tarifa de Operación del CENACE en \$/kWh}) + (\text{Consumo Energético en kWh} \times \\ & \text{Tarifa de Servicios Convexos no MEM en \$/kWh}) \end{aligned}$$

Los resultados de las simulaciones y su conversión a costos energéticos permiten comparar distintas estrategias de diseño y su impacto económico. En la Tabla 12, se muestran los costos mensuales y anuales asociados con diferentes combinaciones de sistemas constructivos, con base en las tarifas actuales de la CFE.

Tabla 12. Extracto de resultados de simulaciones y costo energético.

Costos por recibo CFE (\$)	Muro base: Ladrillo con 0.508 m EXP			
	Concreto	Concreto + 0.0127 EXP	Concreto + 0.025 EXP	Concreto + 0.05 EXP
EN	\$ 3,054	\$ 3,054	\$ 3,054	\$ 3,054
FEB	\$ 2,922	\$ 2,922	\$ 2,922	\$ 2,922
MAR	\$ 3,108	\$ 3,108	\$ 3,108	\$ 3,108
AB	\$ 5,790	\$ 5,836	\$ 5,836	\$ 5,846
MAY	\$ 7,231	\$ 7,222	\$ 7,222	\$ 7,208
JUN	\$ 7,847	\$ 7,801	\$ 7,801	\$ 7,760
JUL	\$ 10,390	\$ 10,246	\$ 10,246	\$ 10,137
AG	\$ 10,893	\$ 10,769	\$ 10,769	\$ 10,674
SEPT	\$ 9,334	\$ 9,321	\$ 9,321	\$ 9,314
OCT	\$ 8,143	\$ 8,225	\$ 8,225	\$ 8,307
NOV	\$ 3,137	\$ 3,137	\$ 3,137	\$ 3,137
DIC	\$ 3,039	\$ 3,039	\$ 3,039	\$ 3,039
ANUAL	\$ 74,918	\$ 74,680	\$ 74,680	\$ 74,506

Así pues, el análisis de costos energéticos facilita la identificación de soluciones que no solo optimizan el consumo de energía, sino que también reducen los costos operativos, proporcionando una evaluación integral que contribuye a la toma de decisiones más informadas y sostenibles para el proyecto.

3.3.3 Confort ambiental interior

Derivado del capítulo 2, generar calidad de vida en el ambiente construido puede referirse a conceptos como habitabilidad ambiental interior, calidad ambiental interior y confort ambiental interior ya que consideran los mismos indicadores y atributos que delimitan la satisfacción integral del usuario en relación con el espacio habitado. Es de particular interés a esta investigación el ámbito térmico de tal manera que la evaluación de esta relación permita mejorar la calidad de vida del habitante.

Los parámetros seleccionados en este análisis buscan establecer condiciones óptimas de confort térmico para edificios comerciales, considerando la calidad higrotérmica mediante la temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa (%). Estos criterios, detallados en la Tabla 13, se derivan de normativas nacionales e internacionales, como normativas y regulaciones internacionales como las de (EPA (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2016), (Instituto Well del Bienestar [IWB], 2019), LEED (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], 2019) y (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE], 2017). Además, se consideraron las Normas Mexicanas, en particular la NOM-015-STPS-2001 emitida por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2002).

Tabla 13. Parámetros sobre condiciones de confort térmico interior comercial.

PUNTUACIÓN	Temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad relativa (%)
Bienestar	22-26	40 -50
Aceptable	19-22, 26-28	35-40, 50-60
Moderado	16-19, 28-30	20-35, 60-65
Insalubre	13-16, 30-32	15-20, 65-80
Muy insalubre	<13, >32	<15, >80

Elaboración propia a partir de (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2002; Instituto Well del Bienestar [IWB], 2019; Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE], 2017, 2019).

Además, los estándares internacionales como los de ASHRAE y el Instituto Well del Bienestar (IWB) establecen rangos de confort específicos que buscan evitar las condiciones de insalubridad, generando entornos que favorezcan la productividad y el bienestar de los ocupantes. Estos estándares consideran que el rango ideal de

temperatura se sitúa entre 22 y 26 °C con una humedad relativa entre el 40 y el 50%. Las condiciones insalubres, especialmente a temperaturas por encima de los 30 °C o humedad relativa superior al 80%, pueden afectar significativamente el rendimiento y la salud de los ocupantes, incrementando el riesgo de fatiga térmica y otros problemas de salud.

Los valores propuestos buscan no solo cumplir con los estándares, sino también optimizar la calidad de los espacios comerciales en términos de confort térmico, lumínico y de calidad de aire. Estos rangos representan una guía para la evaluación y mejora de las condiciones de confort ambiental interior, promoviendo un entorno saludable y productivo para los ocupantes.

3.3.4 Carbono incorporado

Entre las diversas alternativas para disminuir la huella de carbono de los edificios, se destaca la selección de los materiales de construcción como una opción prometedora para alcanzar reducciones significativas en las emisiones de dióxido de carbono (Hammad et al., 2018). En el caso de un edificio, el carbono incorporado abarca todas las emisiones asociadas con los materiales de construcción, el proceso de construcción en sí, así como los elementos y accesorios interiores; además, incluye las emisiones relacionadas con la demolición y eliminación del edificio al final de su vida útil (A. García, 2014).

El concepto de carbono incorporado es útil para comparar el impacto ambiental de diferentes materiales de construcción, diseños y métodos de construcción, lo que facilita la identificación de elementos con alto contenido de carbono y la promoción de alternativas que reduzcan las emisiones de CO₂ (A. García, 2014).

DesignBuilder ofrece un reporte básico sobre el carbono incorporado y los datos de carbono equivalente para el edificio, los cuales, abarcan únicamente los materiales de construcción y vidrio a granel, excluyendo la iluminación, el HVAC y otros servicios de construcción (A. García, 2014).

Para calcular el carbono incorporado del conjunto la plantilla constructiva elegida, se emplea información de la base de datos “Inventario de Carbono y Energía (ICE)” (Hammond y Jones, 2011), la cual sigue una metodología *cradle-to-gate*. El cálculo se lleva a cabo sumando los datos de carbono incorporado de cada superficie en el modelo, los cuales son calculados utilizando las capas de materiales de construcción y los datos de carbono incorporado de cada material (A. García, 2014). Los datos de carbono

incorporado para los materiales utilizados en los SC se muestran en la Tabla 3 del subapartado 3.1.3 Variables de Estudio.

3.4 Simulación Dinámica Multiobjetivo

Los avances en el concepto de modelos han ampliado su alcance para incluir representaciones no físicas y su manipulación. En este sentido, la simulación por computadora ofrece una alternativa efectiva para resolver problemas que son difíciles de abordar con métodos matemáticos tradicionales o que requieren un tiempo considerable para su resolución, ya que es posible predecir el consumo de energía de instalaciones completas al crear modelos personalizados de edificios y sus sistemas, los cuales son evaluados utilizando datos meteorológicos por hora. (Rieder, 2003).

La medición en cuasiexperimentos es crucial para evaluar la influencia de la variable independiente (Velázquez Fernández y Rey Cordova, 2007); es pues, que para este estudio, el enfoque de simulación dinámica multiobjetivo se utilizó como herramienta para estimar las características de simulaciones térmico-lumínicas.

Para analizar el potencial energético y ambiental de las variables de estudio, el programa fue *DesignBuilder®*, en la versión 6.0. Este programa ofrece una evaluación precisa de diversos aspectos que influyen en el rendimiento ambiental y energético de los edificio (A. García, 2014), además cuenta con nueve módulos de análisis los cuales se explican en el subapartado 2.4; del conjunto se utilizaron seis módulos: Visualización, Simulación, Iluminación, HVAC, CFD y Optimización, su relación con el objetivo específico y planteamiento de investigación se muestra en la Tabla 14 a continuación:

Tabla 14. Relación de módulos con las características de investigación.

Módulo	Objetivo específico de investigación	Palabra clave en el planteamiento de investigación
Visualización Simulación	Determinar mediante análisis multiobjetivo, adecuaciones ambientales con mejor adaptación, acorde a rangos específicos de calidad ambiental interior.	Envolverte arquitectónica, Carbono incorporado
HVAC		Eficiencia energética
CFD		Calidad de aire
Optimización	Estimar el potencial energético y ambiental de técnicas de adecuación ambiental multiobjetivo para edificios comerciales en clima cálido desértico muy seco.	Técnicas de Adecuación Ambiental

Fuente: Elaboración propia

Los módulos de Visualización y Simulación se emplearon para analizar los parámetros relacionados con la envolvente arquitectónica, además, mediante el módulo de Optimización, se evaluaron diversas combinaciones de variables descritas en el subapartado 3.2.2 Técnicas de Adecuación. Los resultados obtenidos se registraron en

hojas de cálculo, donde se detallaron las pérdidas o ganancias de calor en kWh, así como el carbono incorporado en kg.

3.4.1 Validación de Simulación

En este estudio, la validación de los modelos de simulación se llevó a cabo considerando la ausencia de datos de monitoreo ambiental reales, por lo que se optó por utilizar una estrategia comparativa con estándares y modelos de referencia reconocidos, complementada con simulaciones paramétricas y ajustes de análisis de sensibilidad para asegurar la robustez y precisión de los resultados. Esta metodología permitió verificar la validez de las simulaciones al replicar condiciones de edificios similares y comparar con parámetros establecidos por organizaciones como ASHRAE.

La metodología aplicada a este proceso de simulación dinámica inicia con el modelado del caso de estudio, al dibujar el edificio con datos derivados del proyecto arquitectónico, así como del archivo climático. Luego, se introducen datos específicos sobre la carga interna, la climatización y la iluminación, recopilados previamente en cédulas de información, y se establecen los patrones de uso; en esta etapa inicial, se realiza una simulación termo energética para verificar la correcta programación de los datos. La siguiente fase del proceso implica la calibración del modelo de simulación dinámica, donde se comparan los datos de la simulación termo-energética con los datos medidos durante el monitoreo ambiental interior, como se ilustra en la Figura 5.

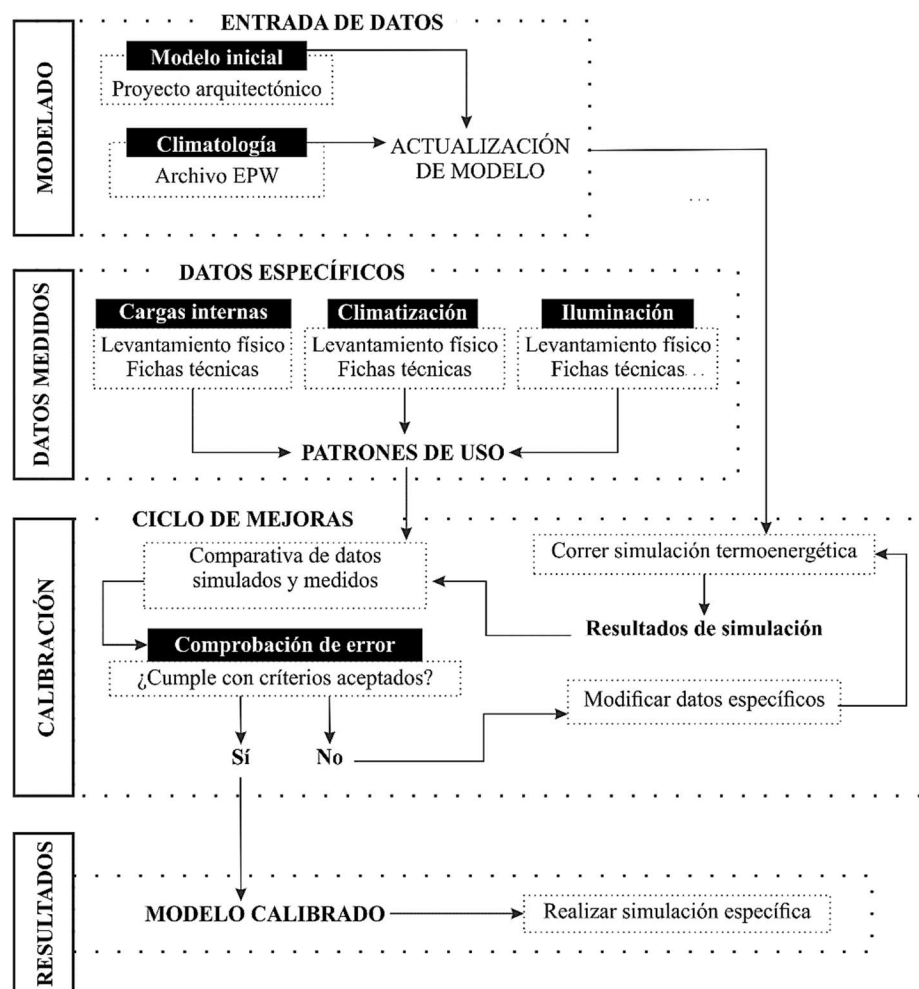


Figura 5. Metodología para calibrar la simulación. Elaboración propia a partir de Tüysüz y Sözer, (2020).

Si la comparación de datos, como se muestra en el ciclo de la Figura 5, satisface los estándares internacionales establecidos para la calibración de simulaciones dinámicas, se procede con la siguiente etapa del proceso. Sin embargo, si no se cumplen estos criterios, es necesario retroceder a la fase uno mencionada previamente, para ajustar los datos necesarios.

En ausencia de monitoreo directo, la calibración de los modelos se apoyó en datos de consumo energético de bases de datos regionales y nacionales; este procedimiento robusteció la precisión del modelo al replicar patrones de uso y cargas térmicas típicas de edificaciones de características similares en la zona climática del estudio.

Finalmente, para validar la precisión de las simulaciones, se utilizó un proceso de comparación cruzada con estándares de desempeño energético y resultados de estudios previos de casos similares. Se identificaron y corrigieron posibles desviaciones en los resultados, lo que permitió afinar las simulaciones para obtener una representación fiel y

aplicable en el análisis de viabilidad de estrategias de adecuación ambiental y optimización del diseño.

3.4.2 Parámetros de simulación

Para evaluar el comportamiento termo-energético de los edificios comerciales en climas desérticos, se establecieron los siguientes parámetros de simulación basados en las condiciones específicas de Mexicali, Baja California, México. Estos parámetros se aplicaron en todas las simulaciones realizadas en este estudio, utilizando el algoritmo de simulación adecuado y condiciones de operación relevantes para reflejar la realidad del sitio, los cuales se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos para modelado y simulaciones energéticas

Datos de simulación	
Sitio	Mexicali, Baja California, México
Algoritmo de simulación	Conduction Transfer Function
Algoritmo de simulación de convección interior	TARP
Algoritmo de simulación de convección exterior	DOE 2
Hvac	
Paquete	
COP	2.95
Refrigeración	Lunes-viernes (09:00-19:00) 01 abril- 31 octubre
Consigna de temperatura mínima	24 °C
Consigna de temperatura máxima	26 °C
Ocupación	
Densidad	0.50 persona/m ²
Tasa metabólica promedio	187 W/persona
Factor de arropamiento	0.9 clo
Equipo e iluminación	
Potencia absoluta de equipos	28.43 W/m ²
Potencia absoluta de luminarias	2.26 W/m ²
Envolvente	
Puertas	5.961 W/m ² K
Ventanas	5.840 W/m ² K
Piso	3.577 W/m ² K
Plafón	2.897 W/m ² K
Muros	Variable
Cubierta	Variable

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar el comportamiento termo-energético de los edificios comerciales en climas desérticos, se establecieron parámetros de simulación basados en las condiciones específicas de Mexicali, Baja California, México, una región caracterizada por sus

temperaturas extremas durante el verano, que se pueden visualizar en el subapartado 3.2.1 Diagnóstico Bioclimático.

En cuanto a las simulaciones se empleó el algoritmo de Función de Transferencia de Conducción (CTF por sus siglas en inglés *Conduction Transfer Function*) para modelar de manera precisa la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio; además de algoritmos específicos para la simulación de la convección como el algoritmo TARP, que es un método utilizado para calcular la convección en superficies internas, y finalmente, el algoritmo DOE 2 para simular la convección exterior y calcular el consumo de energía de superficies externas.

En la metodología del estudio, se definieron los parámetros de simulación termoenergética para modelar el comportamiento de las envolventes y elementos constructivos. Cada sistema constructivo se evaluó con base en su transmitancia térmica (valor U) y espesor, parámetros que influyen en la eficiencia energética y el confort térmico interior, los cuales se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Propiedades de sistemas constructivos en la envolvente

Clave		Sistemas constructivos	U (W/m ² K)	Espesor (m)
MURO	BC0	Bloque concreto (15 mm emplaste cemento-arena, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	2.712	0.17
	BC1	Bloque concreto + 0.0254 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 25.4 mm poliuretano expandido, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	0.909	0.20
	BC2	Bloque relleno parcial + 0.0508 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 50.8 mm poliuretano expandido, bloque de concreto de 150 mm parcialmente relleno de perlita, 19 mm de yeso)	0.546	0.22
	LB0	Ladrillo de barro cocido (15 mm emplaste cemento-arena, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	2.375	0.16
	LB1	Ladrillo de barro cocido + 0.0254 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 25.4 mm poliuretano expandido, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	0.867	0.19
	LB2	Ladrillo de barro cocido + 0.0508 m EXP (15 mm emplaste cemento-arena, 50.8 mm poliuretano expandido, 140 mm ladrillo de barro, 19 mm de yeso)	0.530	0.21
	NOM	Valor U para Mexicali, proporcionado por la NOM-021-ENER-2011	0.521	-
	TES	Panel de yeso y estructura metálica (15 mm emplaste cemento-arena, panel de yeso y estructura metálica de 108 mm rellenos con manta de fibra de vidrio (R25), 19 mm de yeso)	0.746	0.12
	THK	Panel de fibrocemento y estructura (15 mm emplaste cemento-arena, panel de fibrocemento y estructura de acero de 4-1/4", 19 mm de yeso)	0.379	0.13
CUBIERTA	LC0	Losa de concreto (3 mm de pintura elastomérica, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	2.419	0.11
	LC1	Losa de concreto + 0.0254 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 25.4 mm de poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	0.873	0.14
	LC2	Losa de concreto + 0.0508 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 50.8 mm de poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 19 mm de yeso)	0.533	0.16
	NOM	Valor U para Mexicali, proporcionado por la NOM-021-ENER-2011	0.354	-

SD0	Steel Deck (3 mm de pintura elastomérica, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	2.940	0.11
SD1	Steel Deck + 0.0254 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 25.4 mm poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	0.933	0.14
SD2	Steel Deck + 0.0508 m EXP (3 mm de pintura elastomérica, 50.8 mm poliestireno expandido, concreto armado de 100 mm reforzada con 2% de acero, 9 mm Steel Deck)	0.554	0.16
VC0	Vigueta y casetón (15 mm cemento-arena, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.880	0.19
VC1	Vigueta y casetón + 0.0254 m EXP (15 mm cemento-arena, 25.4 mm poliestireno expandido, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.535	0.22
VC2	Vigueta y casetón + 0.0508 m EXP (15 mm cemento-arena, 50.8 mm poliestireno expandido, 170 mm vigueta y casetón, 19 mm yeso)	0.385	0.24
PUERTAS	Marco aluminio y puerta vidrio	5.961	0.06
VENTANAS	Marco aluminio y vidrio claro	5.840	0.06

Fuente: Elaboración propia

La definición de parámetros de simulación es esencial para obtener resultados precisos en la evaluación termo-energética de edificios comerciales en climas desérticos. En este estudio, los parámetros de simulación establecidos para Mexicali, Baja California, México, han permitido modelar de manera detallada el comportamiento energético de diferentes sistemas constructivos, considerando las características climáticas extremas de la región.

Capítulo 4: Resultados

Este capítulo presenta los hallazgos obtenidos a partir de análisis comparativos y simulaciones multiobjetivo, realizados en distintos sistemas constructivos (SC) para edificios comerciales ubicados en climas desérticos muy secos. Se evaluaron diversos materiales y combinaciones de SC para muros y cubiertas, para analizar su eficiencia térmica, energético y su potencial sostenible.

Los resultados se organizan en tres secciones principales. En la primera sección se hace el análisis comparativo de los sistemas constructivos, para analizar las características de cada sistema en cuanto a su desempeño térmico y energético. La segunda sección muestra los resultados de la simulación multiobjetivo, con la finalidad de identificar configuraciones óptimas mediante el método de Pareto y simulación por optimización, para comprender la influencia de cada variable en el rendimiento en general.

Finalmente, la tercera sección se presenta una comparación entre sistemas con y sin aislamiento térmico, que muestra el impacto a la Eficiencia Energética (EE) y Carbono Incorporado por uso de energía eléctrica. Los resultados obtenidos permiten identificar soluciones constructivas eficientes para climas desérticos, como un marco de referencia útil para futuras implementaciones en el sector de la construcción sostenible.

4.1 Eficiencia energética de combinación de muros y cubiertas sin aislamiento

El análisis y procesamiento de datos es esencial en esta investigación, ya que permite obtener resultados detallados sobre el rendimiento energético de diversas combinaciones de sistemas constructivos (SC) a través de la herramienta de simulación DesignBuilder®, se evaluó configuración de muros y cubiertas, para identificar patrones, y relaciones entre las propiedades térmicas de los materiales y el desempeño energético del edificio.

Se evaluaron 69 combinaciones de SC para muros y cubiertas, con el objetivo de determinar la optimización y el rendimiento térmico-energético de la envolvente. Los materiales de muros base evaluados fueron:

- Bloque de concreto (BC0): Este material tiene una alta conductividad térmica (1.06 W/m-K) y una alta densidad de 1664 kg/m³. Adicionalmente, la configuración se evaluó con aislamiento de capas de poliestireno expandido (EPS): BC1 con 0.0254 m y BC2 con 0.0508 m para mejorar su resistencia térmica.

- Ladrillo de Barro (LB0): el cual presenta una conductividad moderada de $0.722 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, de consistencia sólida con una densidad de $1,920 \text{ kg/m}^3$, que permite retener el calor en su masa. Este material se evaluó también con espesores de aislamiento de 0.0254 m (LB1) y 0.0508 m (LB2), lo que permitió observar cómo la reducción en el valor U mejora el rendimiento energético general.
- Panel de Yeso y Estructura Metálica (PEM): Material de baja masa térmica, por contener un volumen de fibra de vidrio en su interior. El sistema está compuesto por una estructura de yeso reforzado con aislante de fibra de vidrio (R19). Tiene un Valor U de $0.746 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, lo que lo convierte en una opción adecuada para climas cálidos, donde se busca minimizar las ganancias térmicas.
- Thermorock (THK): Este sistema se caracteriza por su baja conductividad térmica ($0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y baja densidad de 215 kg/m^3 , proporcionando una excelente eficiencia y aislamiento térmico. Utiliza una estructura exterior de fibrocemento de 0.003m en cada lado, que permite dar rigidez a la capa de 0.11 m de poliestireno. El sistema se conforma de un panel, el cual es confinado a través de postes metálicos tipo I elaborados con lamina Steel. Es un sistema con un bajo valor U de $0.379 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ que permite reducir las transferencias de calor.

En cubiertas, los sistemas constructivo base, se consideraron:

- Losa de concreto (LC0): Con una conductividad térmica alta de $2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y un Valor U de $2.419 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, esta estructura cuenta con una alta densidad. Adicionalmente se evaluó con capas de EPS 0.0254 m (LC1) y 0.0508 m (LC2) para reducir las ganancias de calor.
- Steel Deck (SD0): Esta cubierta de acero con una capa de concreto reforzado de 0.10 m . Su valor U es de $2.94 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Una de sus desventajas térmicas es que el acero cuenta con una alta conductividad térmica de ($50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ para el acero), lo que eficientiza los tiempos de construcción, pero requiere aislamiento para controlar las ganancias térmicas, tanto del acero como del concreto. Se evaluaron opciones SD1 con 0.0254 m y SD2 con 0.0508 m de EPS, que eficientiza su transmitancia térmica hasta $0.554 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

- **Vigueta Casetón de Poliestireno (VC0):** Este sistema estructural de aislamiento tiene una Valor U bajo (entre 0.385 y 0.880 W/m²·K), lo que proporciona una excelente resistencia térmica incluso sin aislamiento adicional. Se evaluaron las versiones VC1 con 0.0254 m y VC2 con 0.0508 m de EPS para maximizar su eficiencia.

Los resultados de la simulación dinámica se procesaron como valores mensuales y se realizaron las estimaciones necesarias para el balance térmico, confort térmico y carbono incorporado de cada combinación de SC, se compilaron en una tabla con los valores anuales. En la Tabla 17 se presentan los resultados-estadísticos descriptivos de dichos datos.

Tabla 17. Resultados estadísticos de simulaciones termo-energéticas

Estadístico	Ganancias por muro (kWh)	Ganancias por piso (kWh)	Ganancias por cubierta (kWh)	Ganancias por envolvente (kWh)	Temperatura interior (°C)	Consumo por refrigeración (kWh)	Costo energético	Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ e/kg)
Min	1,051	-8,061	-5,179	-4,765	23.4	13,127	\$67,590	35,418
Prom	4,031	-6,415	-2,011	-1,903	23.7	14,259	\$68,605	150,946
Max	11,219	-3,738	265	3,987	24.0	16,573	\$71,085	283,121

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el análisis comparativo de balances de energía y costos energéticos, se tomaron en cuenta las temporadas de verano, invierno y la anual; la relación de área muro-cubierta es de 2.35, con un 70% (299 m²) de la superficie de la envolvente destinada a muros y un 30% (127 m²) destinada a cubiertas.

Las transmitancias térmicas (valor-U) de los SC de muros y cubiertas varían entre 0.379 y 2.712 W/m²·K y entre 0.385 y 2.942 W/m²·K, respectivamente. Esta diferencia muestra que los SC de cubierta con altos valores de U, deberían representar las principales fuentes de ganancias térmicas; sin embargo, debido a la mayor proporción de superficie de muros, las ganancias térmicas anuales son mayores por muros.

Estas ganancias de calor están también influenciadas por los grandes diferenciales de temperaturas ambientales y del suelo (ver Tabla 7 de la sección 3.2.1 Diagnóstico Bioclimático), ya que, se observan pérdidas de calor por suelo cuando la temperatura de la tierra está por debajo de la temperatura interior, lo cual ocurre de febrero a septiembre. De manera opuesta, entre octubre y enero se presentan ganancias de calor debido a que la temperatura de la tierra supera la temperatura interior.

Durante los meses de mayo a septiembre, la temperatura de bulbo seco es mayor que la del espacio interior, lo que provoca ganancias de calor a través de los muros y la cubierta. En contraste, de noviembre a marzo, la temperatura exterior es menor que la del espacio interior, lo que genera pérdidas de calor tanto por los muros como por la cubierta. En octubre, debido a las altas temperaturas de la tierra y del ambiente, se presentan ganancias de calor por el suelo y los muros, aunque, debido a la elevada transmitancia térmica de las cubiertas, se puede observar en la Figura 6, que se producen pérdidas de energía, debido a que la temperatura del ambiente es inferior a la temperatura interior.

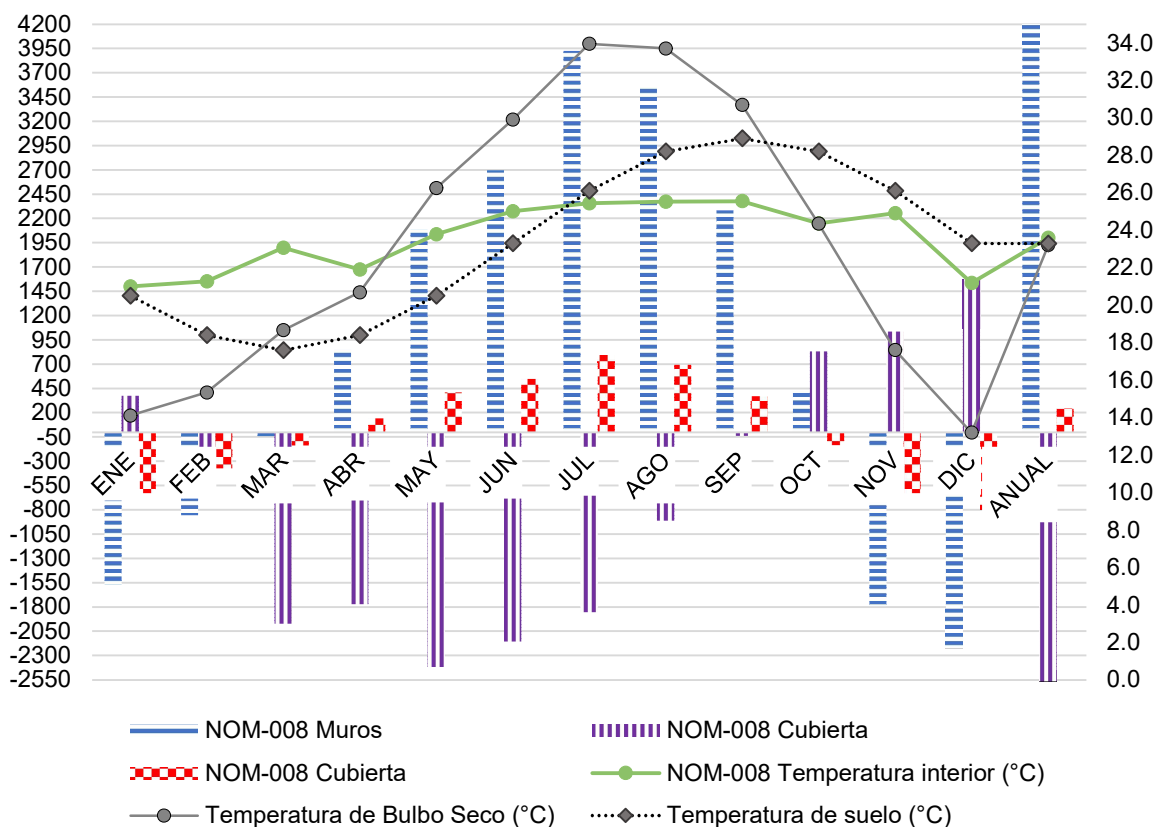


Figura 6. Balance térmico anual para envoltorio de acuerdo con la NOM-008-ENER-2011

El análisis estadístico de las simulaciones termo-energéticas revela una significativa variabilidad en el desempeño de los sistemas constructivos. Las ganancias de calor en los muros varían ampliamente, con un mínimo de 1,051 kWh y un máximo de 11,219 kWh, lo cual destaca el impacto de las propiedades térmicas de los materiales en el balance energético. En contraste, las pérdidas de calor en el suelo oscilan entre -8,061 kWh y -3,738 kWh, indicando una constante pérdida de calor hacia el suelo, mientras que las ganancias en la cubierta fluctúan entre -5,179 kWh y 265 kWh.

El balance térmico de la envolvente muestra una oscilación de -4,765 kWh a 3,987 kWh, con un promedio de 1,903 kWh, reflejando una variabilidad en la ganancia o pérdida neta de calor en función del tipo de sistema constructivo. La temperatura interior se mantiene estable, con un promedio de 23.7°C, logrando mantener el confort térmico. El consumo energético anual varía de 26,362 kWh a 30,066 kWh, con un costo asociado que va de \$3,682 a \$5,024. En cuanto al impacto ambiental el carbono incorporado está en el rango de 18,331 a 24,634 kgCO₂e/kg.

El análisis del balance térmico de la envolvente revela que el elemento más vulnerable es el piso, por su alta conductividad térmica, reducido espesor y baja resistencia térmica de 4.0 W/m² K. Esta característica se observa al comparar casos específicos, como el de mayores pérdidas de calor en la combinación BC0-LC0 y el de mejores resultados en LB2-LC0, con una diferencia de pérdidas de 38,818.8 kWh, como se observa en la Figura 7, sin embargo, esta tendencia de pérdidas por suelo es consistente en todas las combinaciones constructivas.

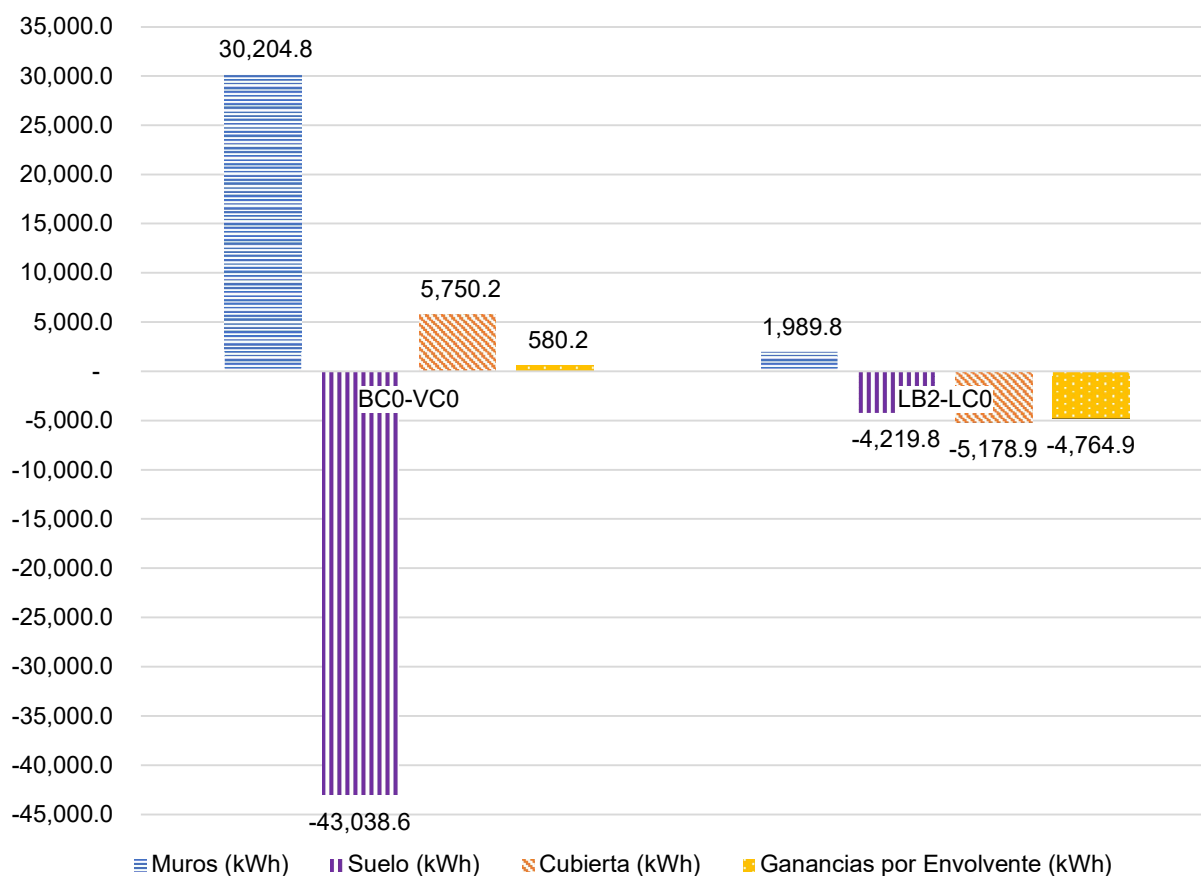


Figura 7. Balance térmico de la envolvente para BC0-VC0 y LB2-LC0

Por otro lado, el muro se identifica como el elemento crítico en cuanto a ganancias térmicas, debido a la variabilidad en la resistencia térmica de los materiales. Los SC con el menor valor-U, como el THK ($0.373 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), registran bajas ganancias térmicas de 2,846 kWh, mientras que aquellos con los valores-U más altos, como el BC ($2.409 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), alcanzan hasta los 31,613 kWh. Esto muestra que el bloque es el material menos eficiente térmicamente, mientras que el thermorock muestra el mejor desempeño.

En lo que respecta a las cubiertas, se observa una diferencia notable de 4,507 kWh entre el sistema más eficiente (SD2 con cargas térmicas de 1,244 kWh) y el menos eficiente (VC0 con cargas térmicas de 5,750 kWh). Este ahorro en el sistema SD2 se atribuye al uso de aislamiento de poliestireno de 0.0508 m, lo cual mejora el rendimiento térmico de este tipo de cubierta, reduciendo su valor-U de $2.94 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ a $0.554 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Aunque las resistencias térmicas de los materiales para muros y cubiertas varían significativamente, el análisis muestra que la mayor contribución a las ganancias térmicas proviene de los muros, debido al mayor porcentaje de área, que representa el 70% de la envolvente. Sin embargo, las combinaciones que utilizan muros con bajo valor-U y cubiertas con valores-U más elevados tienden a presentar pérdidas térmicas a través de la cubierta, por lo que se debe poner especial cuidado en la necesidad de un aislamiento equilibrado en la envolvente para optimizar el balance térmico.

Al examinar el rendimiento térmico anual, se encuentran resultados contrastantes en las combinaciones constructivas. Por ejemplo, la combinación LB2-SD2, con valores-U de $0.517 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para muros y $0.554 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para cubiertas, muestran pérdidas de calor de -23,205 kWh. En contraste, la combinación BC0-LC0, con valores-U de $2.409 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y $2.208 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ respectivamente, presentan un balance energético positivo (ganancias de calor) anual de 2,598 kWh, debido a su baja resistencia térmica y mayores ganancias de calor. Ambos casos se visualizan en la Figura 8.

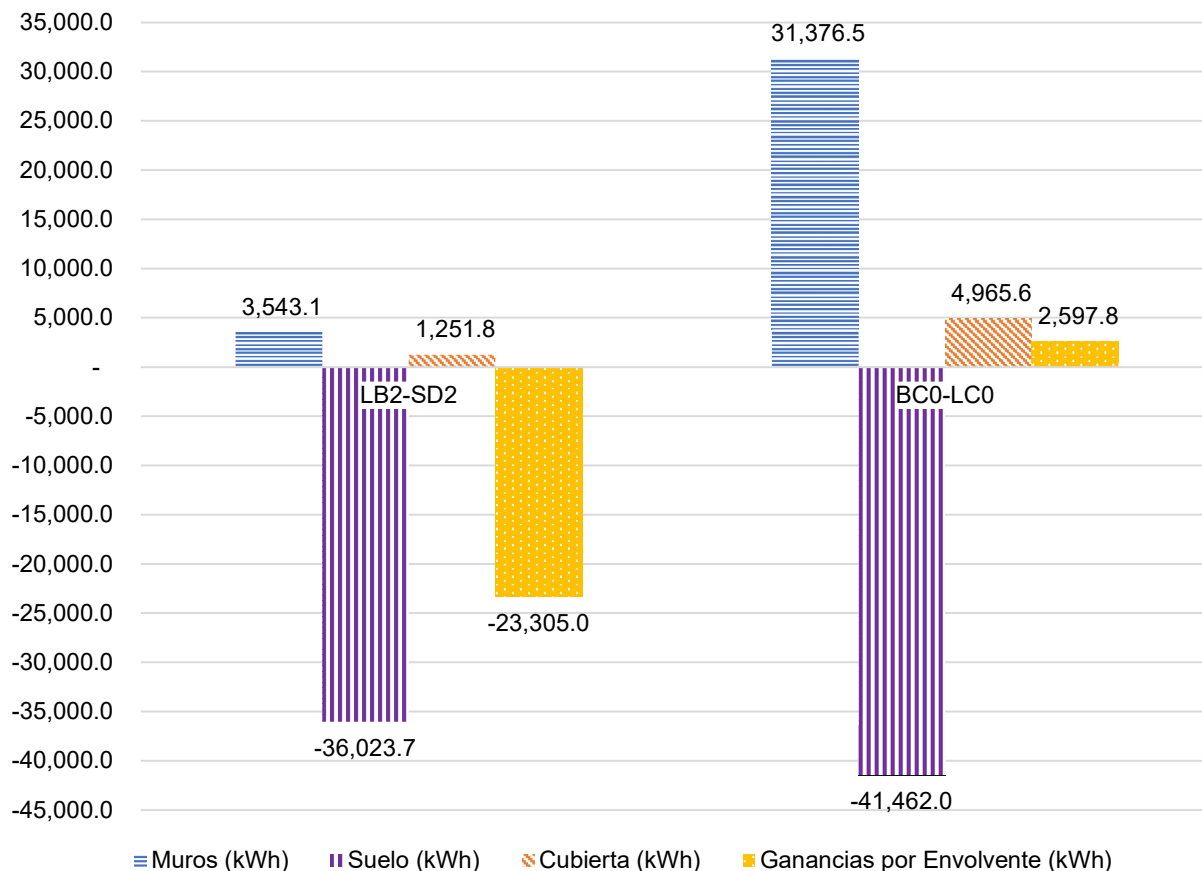


Figura 8. Balance térmico para LB2-SD2 y BC0-LC0

Respecto al confort térmico, la diferencia entre el mejor y el peor caso en temperatura interior es de 0.8°C , manteniéndose todos los sistemas dentro del rango óptimo de $21\text{-}25^{\circ}\text{C}$ para la productividad del usuario. La combinación con más horas de disconfort (1,626 horas) corresponde a BC2-SD0, mientras que el caso más confortable (1,340 horas) es TEM-SD2.

En términos de consumo energético, las combinaciones que utilizan muros sin aislamiento, como los de bloque y ladrillo, registran los mayores consumos de refrigeración, lo cual afecta negativamente el costo energético. Estos sistemas son seguidos en consumo por opciones de panel de yeso y bloque con 0.0254 m de aislamiento, mientras que las configuraciones más eficientes en consumo energético son aquellas con 0.0508 m de aislamiento en los muros, como LB2 y BC2.

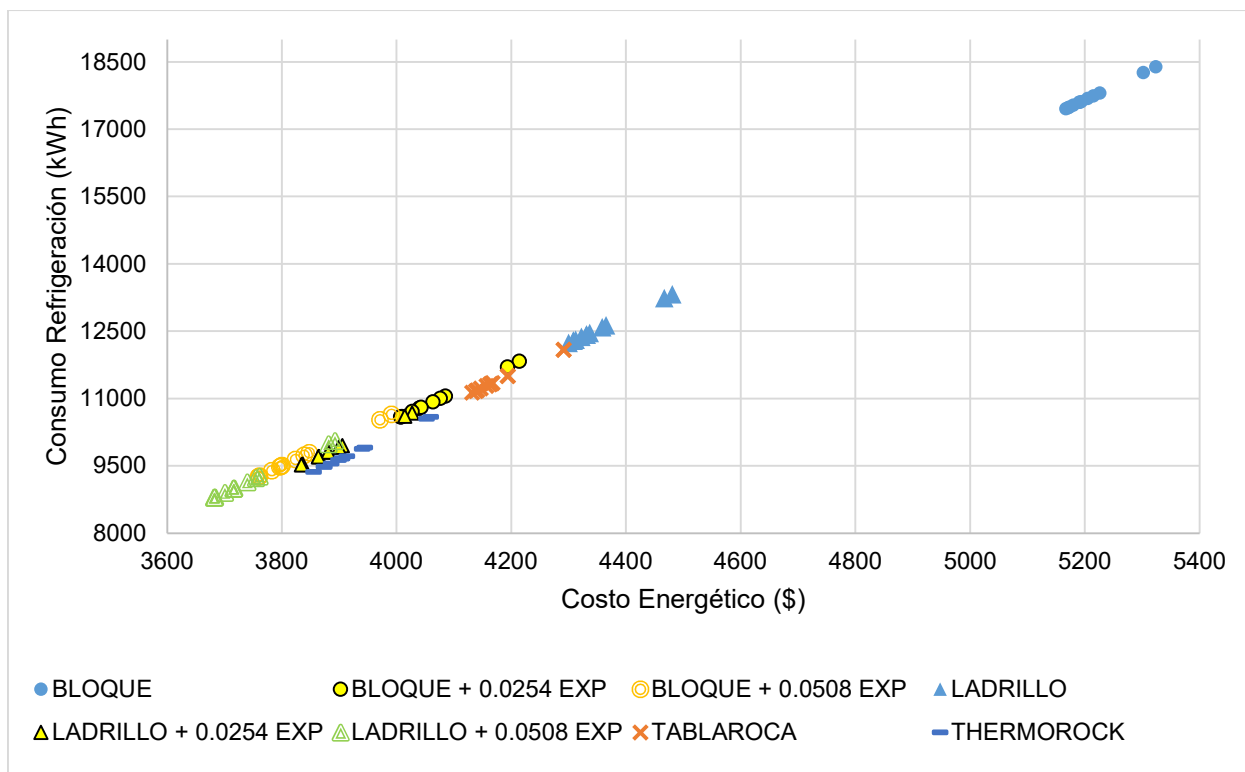


Figura 9. Relación de Consumo por refrigeración y costo energético de sistemas constructivos.

Finalmente, los SC de THK y PEM muestran ser opciones eficientes, con consumos energéticos y costos de refrigeración por debajo del promedio, incluso sin requerir aislamiento adicional. La dispersión de datos entre consumo de refrigeración y costo energético indica que, para los muros de bloque, el aislamiento es esencial para lograr una combinación constructiva eficiente y con menos fluctuaciones de temperatura interior. En cuanto a las cubiertas, las opciones sin aislamiento, presentan un mayor consumo de refrigeración, aunque no necesariamente un mayor costo energético, como en la combinación BC1-VC0 que reduce en casi un 50% el consumo por refrigeración y aproximadamente \$30,366 en el costo energético.

4.1.1 Eficiencia energética de Muros

Al analizar las combinaciones con muros SC base, las mayores ganancias de calor anuales se dan en el BC0 (más alto Valor U de la Tabla 16), ya que oscilan entre 2,963 a 3,987 kWh dependiendo del SC de cubierta. Ahora bien, en los casos con LB0 (con valor U de 2.375 W/m²K) presentan mejor comportamiento térmico, con ganancias de calor entre 1,423 a 2,480 kWh; esto representa en promedio 45% menos ganancias de calor al construir con muros de ladrillo contra muros de bloque.

Por el contrario, los SC base que tienen aislamiento térmico (THK con EPS y PEM con fibra de vidrio), presentan pérdidas de energía. Las combinaciones constructivas con mayores pérdidas de calor se dan con muros de THK de Valor U $0.379 \text{ W/m}^2\text{K}$ (menor Valor U de la Tabla 16), el cual oscila entre 3,531 a 4,673 kWh, mientras que con muros PEM (Valor U $0.746 \text{ W/m}^2\text{K}$), tiene 66% menos pérdidas de calor que THK, ya que oscilan entre 828 a 1,978 kWh anuales.

La comparación en términos anuales demuestra que, de los SC base, el bloque es el material con peor comportamiento térmico, mientras que los muros de estructura ligera son los de mejor desempeño térmico debido a que tienen un mejor balance térmico anual.

No obstante, los casos con muro de bloque y de ladrillo el añadir EPS al SC mejora significativamente la eficiencia térmica de la envolvente, ya que, con BC1 en promedio se disminuyen las ganancias térmicas anuales en 72%, mientras que con BC2 en 83%. En cuanto a los casos con ladrillo, las ganancias de calor disminuyen en 63% con LC1, mientras que con LB2, solo el 69%. Sin embargo, es necesario estudiar el balance energético estacional para determinar la eficiencia energética que los SC base tienen contra los SC con aislamiento térmico adicional.

4.1.2 Eficiencia energética de cubiertas.

En este apartado se analizarán los distintos SC de cubiertas en relación con su eficiencia térmica y el intercambio energético anual. Este análisis es crucial para determinar qué tipo de cubierta ofrece el mejor rendimiento en términos de ahorro energético y reducción de pérdidas de calor.

El mayor intercambio energético de los SC de cubierta se da con LC0 de Valor U de $2.419 \text{ W/m}^2\text{K}$, esta losa tiene pérdidas de calor anuales por cubierta entre 4,872 a 5,179 kWh; seguido de SD0 (Valor U $2.940 \text{ W/m}^2\text{K}$) con una eficiencia térmica de 13% al combinarlo con un SC de muro con aislamiento y de 19% mejor al combinarlo con BC0 o LB0. No obstante, el menor intercambio energético es con losa de vigueta casetón (VC0 = $0.88 \text{ W/m}^2\text{K}$), ya que su balance térmico anual oscila entre los -106 a 240 kWh, dependiendo del SC de muros con que se combine.

Al agrega aislamiento térmico al SC de cubierta se disminuye la oscilación de ganancias de cubierta. Para los casos con cubiertas de concreto, adicionar EPS disminuye en 51% las pérdidas de calor del sistema de muros LB1, mientras que para los casos con LB2, disminuye en 65%. De igual manera, para la losa de Steel Deck, la aplicación de EPS disminuye en 50% para SD1 y 65% para SD2. De manera que, para estos casos se demuestra que el uso de aislamiento mejora significativamente la

eficiencia energética de la losa de concreto y Steel Deck. Sin embargo, añadir EPS en la losa de vigueta casetón no tiene un impacto significativo en la reducción de transferencia de calor, ya que conforme aumenta el espesor de aislamiento se encontraron diferencias de 8 a 25 kWh para VC1 y de 68 a 88 kWh para VC2 contra VC0.

En la Figura 10, se observa que, al combinar SC con menor transmitancia térmica en muros con una mayor transmitancia en cubierta, se dan mayores pérdidas por cubierta como se observa en el caso PEM-LC0 o LC2-LC0. Esto debido a que anualmente los SC de muros con aislamiento, tienen menos ganancias de calor y menos pérdidas de energía; pero hay grandes ganancias térmicas por suelo que aportan calor al interior, el cual se pierde por el elemento con mayor valor U de la envolvente que en estos casos es la cubierta. Esto demuestra que es importante tener un aislamiento térmico equilibrado en la envolvente del edificio, para optimizar el balance térmico por temporada de manera efectiva.

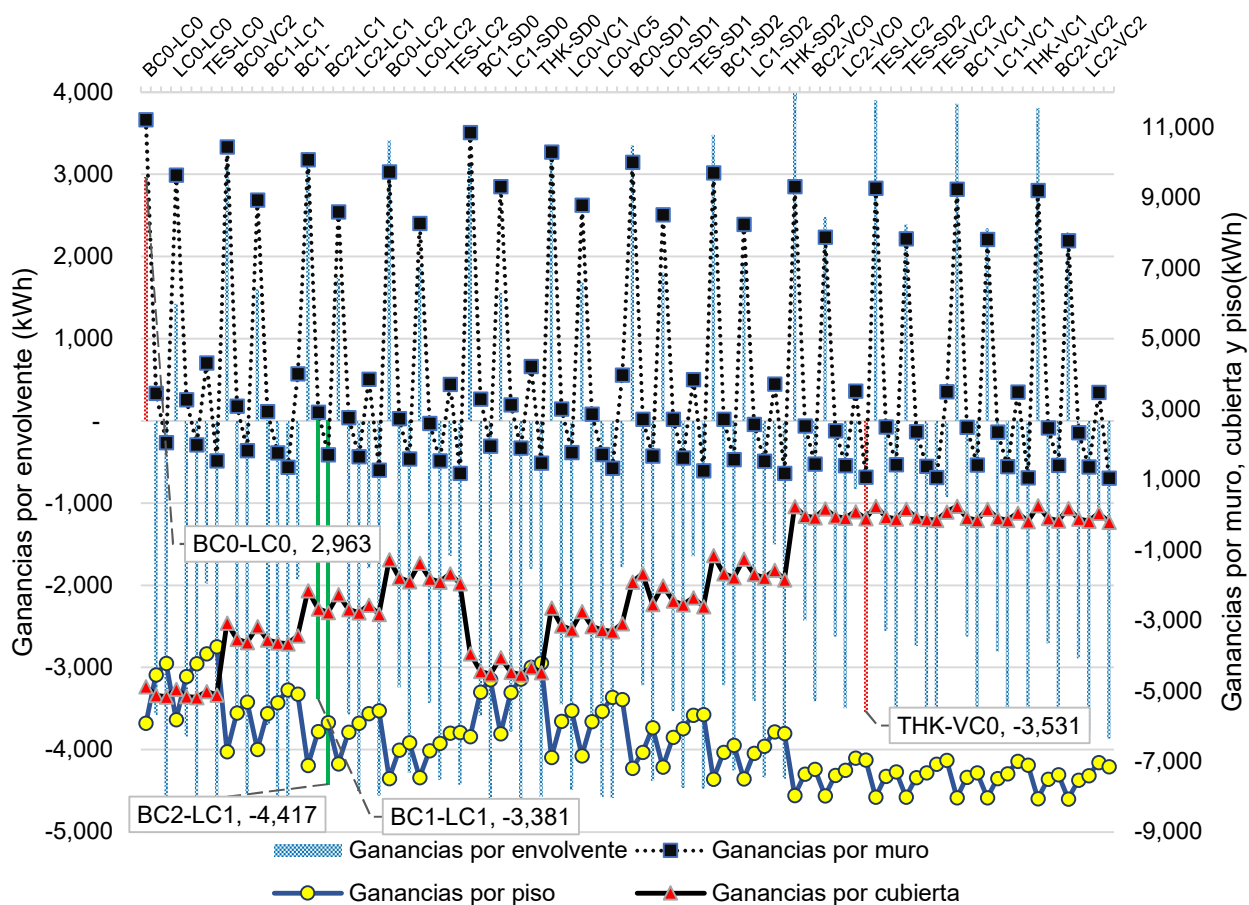


Figura 10. Consumos energéticos y balance térmico de combinaciones de SC

Los peores casos de balance térmico anual para una envolvente con relación área muro-cubierta de 2.35, se dan con BC0-VC0 y LB2-LC0. Ya que, representan los caso con mayores ganancias de calor anuales (3,987 kWh) y un consumo energético de 30,066 kWh; mientras que las mayores pérdidas calor se dan con LB2-LC0 (-4,765 kWh), se debe a la baja resistencia térmica la cubierta y el intercambio radiativo con la bóveda celeste, pero con consumo energético anual de 26,565 kWh.

Por el contrario, las combinaciones que tienen una menor oscilación de intercambio térmico en la envolvente son LB0-LC0 (1,423 kWh), con un consumo energético de 29,403 kWh y LB1-VC2 (pérdidas anuales de 828 kWh), pero con consumo energético de 28,292 kWh. Aunque una oscilación baja en el intercambio de calor parece indicar estabilidad térmica, esta neutralidad puede representar eficiencia en una temporada y menos eficiente en otra, dependiendo de su capacidad para limitar las pérdidas de calor en invierno o las ganancias de calor en verano, especialmente cuando se evalúa climatización artificial, por lo que es necesario analizar el comportamiento mensual de la edificación.

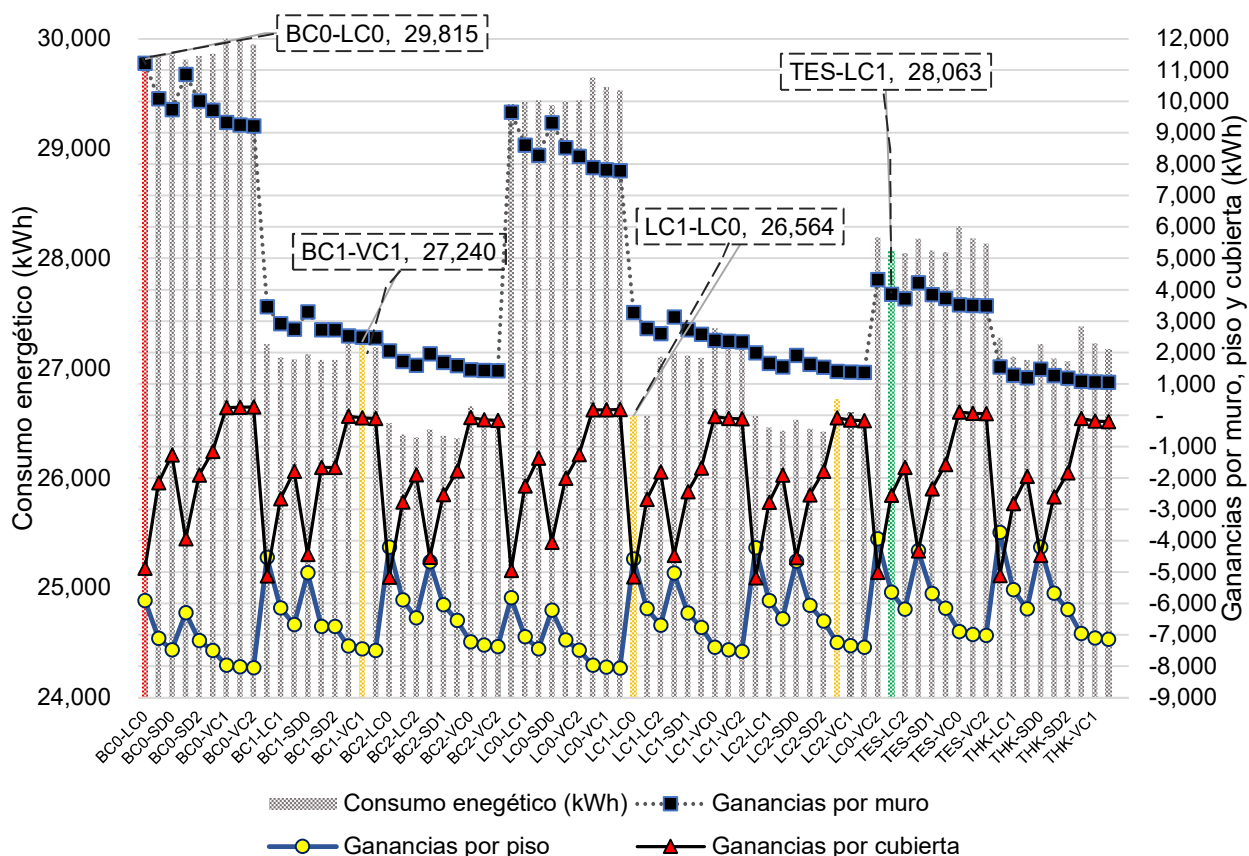


Figura 11. Consumo energético y ganancias por envoltura

Al tomar como referencia el desglose del consumo energético que se muestra en la Figura 12, se observa que el mayor consumo energético es de abril a octubre, meses en que la edificación está climatizada a 24°C. Para el caso LB2-LC0 la simulación termoenergética anual estimó un consumo total de 26,564 kWh por climatización, equipo e iluminación. Durante la temporada sin climatización el 95% de la energía es consumida por equipos y el 5% por iluminación; mientras que, de abril a octubre se consume 21,111 kWh con el 62% por climatización el 37% por equipo y el 2% por iluminación. Mientras que, para BC0-VC0, el consumo anual es de 30,066 kWh, del cual el periodo climatizado representa el 82% con 24,527 kWh, distribuido en 66% consumo por climatización, 32% por equipo y 2% por iluminación.

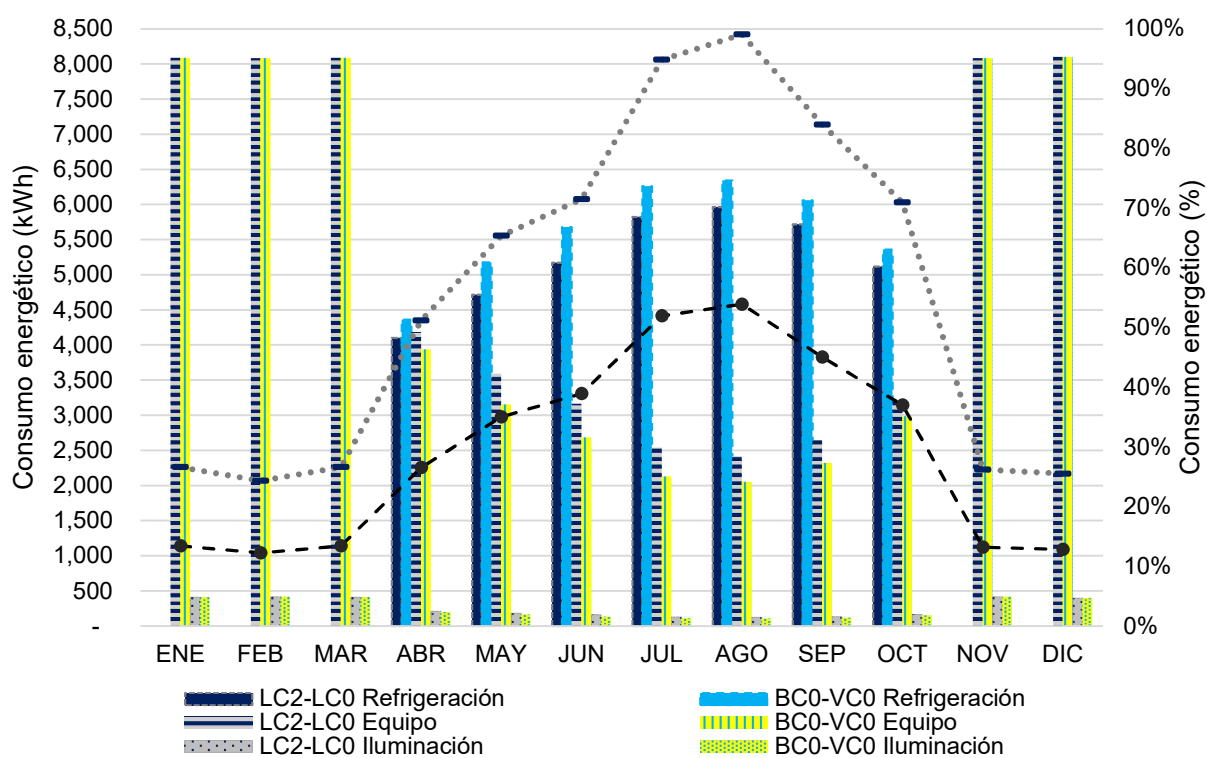


Figura 12. Consumo de carga interna: LC2-LC0 y BC0-VC0

4.1.3 Eficiencia energética en periodo climatizado

Hacer un estudio por temporada, es relevante debido a que los mayores consumos energéticos se dan en verano debido a las altas temperaturas de bulbo seco (TBS), esta situación genera demandas significativas sobre los sistemas de refrigeración pues afecta directamente el balance térmico del edificio.

Este apartado examina cómo las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente influyen en la eficiencia energética y el consumo de energía durante la temporada de verano, que, para ciudades como la del caso de estudio, a partir de abril, la

TBS mínimas y máximas extremas son de 8.4°C y 35.5°C, valores que se incrementa progresivamente hasta alcanzar el pico de temperatura en julio con TBS promedio entre 23°C mínima y 47.2°C máximo.

Con este contexto, se comprueba que la mayor repercusión del comportamiento anual es debido a la temporada de verano, ya que, las combinaciones con muros BC0 presentan los mayores consumos energéticos debido a que la alta transmitancia térmica del SC, pero, que utilizar cubiertas que en el propio SC contenga aislamiento, este genera también mayores ganancias térmica pues no permite pérdidas de calor por la noche.

La combinación BC0-VC0 tiene 12,808 kWh de ganancias térmicas por la envolvente, y para mantener el espacio a una temperatura promedio de 24.51°C, consume 16,573 kWh, lo que representa el 68% del consumo energético total. Esto equivale a un costo energético de \$69,217.6 de abril a octubre, debido principalmente a la relación 2.35 muro-cubierta y la alta transmitancia térmica del SC de muros. Al añadir 0.0254 m o 0.0508 m de EPS al SC de cubierta (VC1 y VC2), se tienen ahorros energéticos \$4,268 y \$5,685 respectivamente; pero al añadir los mismos espesores de aislamiento en muros (BC1 y BC2), se tienen ahorros energéticos de \$7,490 y \$9,295 respectivamente. Esto demuestra que el uso de aislamiento térmico tiene mayor beneficio económico al aplicarse en muros.

En términos de eficiencia energética, al combinar los SC BC0 con losas de Steel Deck (SD1 y SD2), se tienen ahorros de \$9,953 y \$10,527, mientras que, para las losas de concretos (LC1 y LC2), de \$9,953 y \$10,814. Por otro lado, las combinaciones con muros de ladrillo son entre 2% y 3% más eficientes que con muros de bloque, que representan un ahorro económico entre \$1,215 y \$1,248 en la temporada. Mientras que con muros PEM, hay un ahorro económico de 8%.

En cambio, la eficiencia de los SC mejora conforme se añade EPS en las cubiertas, con 0.0254 m de espesor se generan ahorros de \$304 para VC1, \$624 para SD1 y \$641 para LC1; mientras que a aumentar el espesor a 0.0508 m EPS, los ahorros no son significativos ya que es de solo \$51. Los resultados se pueden observar en la Figura 13.

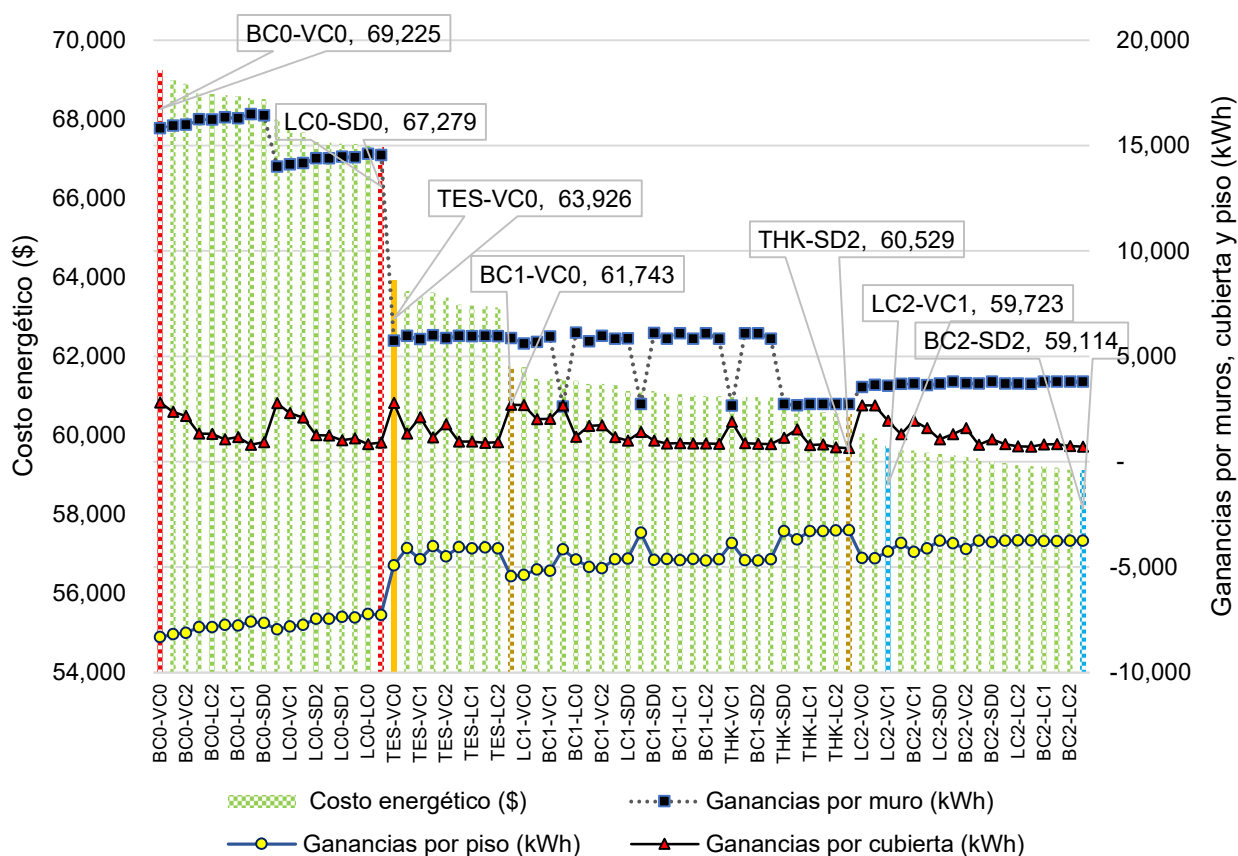


Figura 13. Balance térmico para combinaciones de SC

Cabe señalar que el mayor consumo energético no necesariamente es debido a las mayores ganancias térmicas por muros. La combinación de transmitancia térmica de BC0-VC0 integra un SC de muros con alto Valor U ($2.712 \text{ W/m}^2\text{K}$) y una cubierta con Valor U de $0.880 \text{ W/m}^2\text{K}$; esto representa que, aunque se generan grandes ganancias térmicas por muros durante las horas de altas temperaturas (Durante el día), esta energía se pierde cuando la TBS está por debajo de la temperatura interior (Por la noche). Por el contrario, debido al EPS del propio SC de cubierta, no se tiene enfriamiento radiativo con la bóveda celeste, lo que genera una mayor demanda de enfriamiento.

Para estos casos, añadir 0.0254 m o 0.0508 m de EPS a cubierta, reduce ligeramente las ganancias de calor por envolvente, al tener menor intercambio térmico, pero el ahorro económico promedio es de \$506. Es por esto, que la mejor combinación cuando se tienen muros con alto Valor U, es con una cubierta que también tenga un alto transmitancia térmica que permiten un balance térmico más efectivo; por ejemplo, en los casos en que BC0 se combina con LC0 o SD0, se logran ahorros económicos de \$709 y \$702 respectivamente por disminuir la demanda de enfriamiento. Este mismo escenario,

se encuentran las combinaciones con LB0, de Valor U 2.375 W/m²K, ya las combinaciones de estos muros con las distintas cubiertas presentan ahorros de 2% para aquellas con vigueta y casetón y de 3% en las combinaciones con losa de concreto o Steel Deck, como el caso LB0-SD0, con un ahorro energético para abril-octubre de \$457 contra BC0-SD0.

Para los casos en que se disminuye el Valor U de muros, como el SC panel y estructura metálica (PEM) (Valor U de 0.746 W/m²K), combinarlos con cubiertas de alto aislamiento tiene beneficios. Por ejemplo, con PEM-LC2 tienen 3 veces menos ganancias térmicas por muros-cubierta que BC0-VC0, con un impacto en la eficiencia del consumo por refrigeración del 14%, que en términos de costos corresponde a un ahorro de \$5,794. Para este SC de muro, se considera que la mejor combinación de SC sería con PEM-LC1, ya que el ahorro energético sería \$49 menos que con PEM-LC2, pero la inversión inicial por construcción inicial se reduce.

Los mejores casos se obtienen al integrar muros con baja transmitancia térmica a una envolvente con cubierta de valor U cercano a 0.54 W/m²K, tales son los casos con THK-SD2 (Valor U 0.379, 0.554 W/m²K); LB2-VC1 (Valor U 0.530, 0.535 W/m²K); y BC2-SD2 (0.546, 0.554 W/m²K), pues se tienen ahorros contra BC0-VC0 de \$8,445; \$9,188 y \$9,776 respectivamente. De estos tres casos, la más alta combinación de transmitancia térmica lo tiene BC2-SD2. Se destaca que las propiedades térmicas del sistema Thermorock permite resultados óptimos sin necesidad de añadir EPS extra a muros.

4.2 Eficiencia energética y carbono incorporado de sistemas constructivo.

El análisis comparativo entre sistemas constructivos con y sin aislamiento muestra diferencias significativas en términos de eficiencia energética, carbono incorporado y confort térmico interior. Los resultados reflejan cómo el uso de materiales adecuados, combinado con aislamiento, mejora el rendimiento de la envolvente en edificios comerciales ubicados en climas desérticos muy secos.

4.2.1 Demanda de Refrigeración

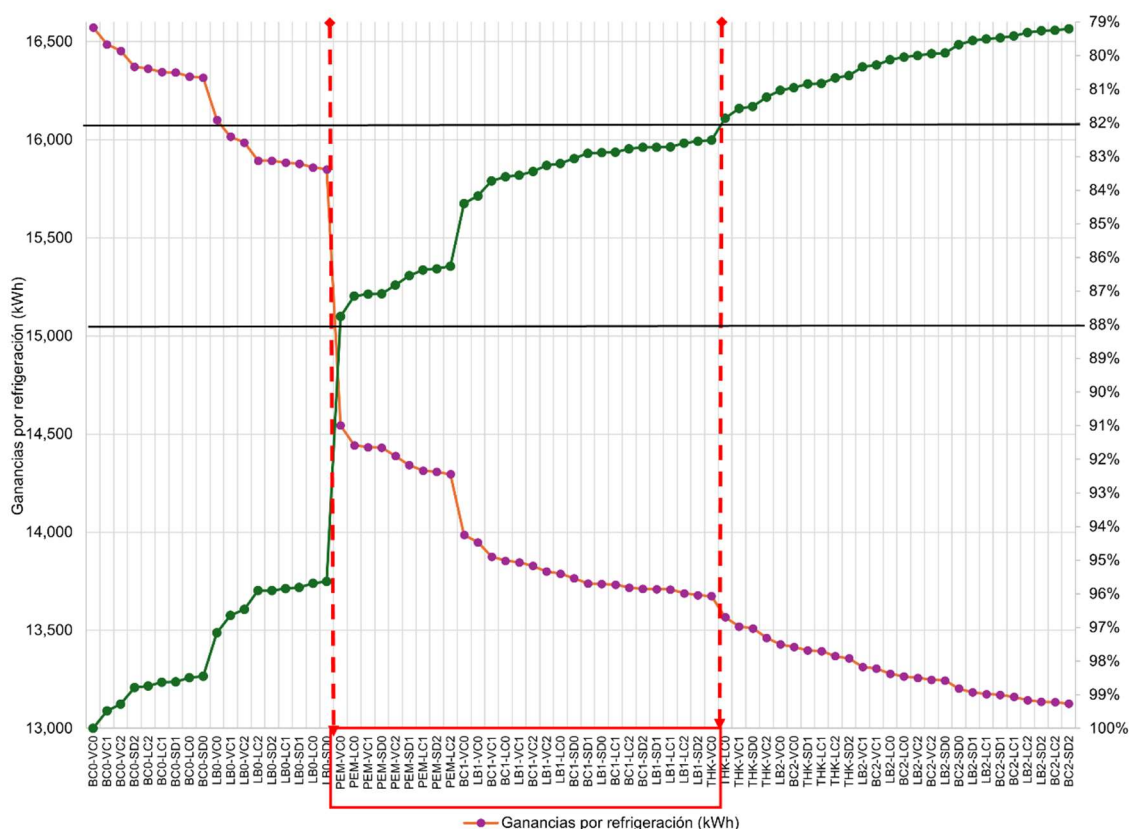
Los sistemas constructivos (SC) sin aislamiento como BC0 y LB0 presentan una alta demanda de refrigeración debido a la transferencia de calor a través de la envolvente; la evaluación energética muestra que las configuraciones de bloque y ladrillo sin aislamiento generan una carga de refrigeración anual cercana a los 24,100 kWh, mientras que sus variantes con aislamiento de 0.025 m de poliestireno expandido (EPS) reducen esta carga a aproximadamente 21,600 kWh, y con 0.0508 m de EPS a 21,050 kWh. Sin

embargo, el SC PEM, con fibra de vidrio en su interior tiene en promedio 13% menos consumo energético que BC0 y LB0 (en promedio reduce a 22,500 kWh), lo que convierte en una opción viable para no añadir aislamiento extra en muros.

Por el contrario, el SC THK es 19% más eficiente (21,550 kWh), muy cercano al 20% de eficiencia que presentan las variantes con BC2 y LB2. Esto implica una disminución del 12% en la demanda de refrigeración, lo que se traduce en menores costos de operación y una menor dependencia de los sistemas de climatización.

La Figura 14 muestra las ganancias por refrigeración en diferentes combinaciones de SC, comparando su eficiencia contra el sistema con mayor carga por refrigeración BC0-VC0. Las combinaciones de SC que se encuentran en el rango del 82% al 88% logran un equilibrio entre la reducción de ganancias térmicas y una construcción eficiente, sin incurrir en los costos adicionales o complejidades de sistemas altamente aislados.

Figura 14. Eficiencia en carga de refrigeración en combinaciones de SC.



Los SC con muros de panel de yeso (PEM) demostraron ser altamente eficientes en la reducción de cargas térmicas debido a el aislamiento de fibra de vidrio del propio SC; las combinaciones más destacadas, PEM-VC2, PEM-LC2 y PEM-SD1 disminuyen hasta el 12-14% en carga térmica, sin requerir grosores extra; además, al ser estructuras

ligeras, los muros PEM en combinación con cubiertas con aislamiento, ofrecen una eficiencia térmica considerable sin requerir grosores excesivos en los materiales, lo cual optimiza la inversión en aislamiento sin sacrificar el rendimiento.

Los sistemas de bloque de concreto o ladrillo con una capa de 0.0254 m de EPS (BC1 o LB2) también mostraron una alta eficiencia térmica, las configuraciones más eficientes dentro de esta categoría son aquellas que se combinan con aislamiento adicional en losa de concreto o Steel Deck, ya que estas configuraciones representan una reducción en cargas de entre el 16-17% en comparación con el sistema BC0-VC0 con cargas de refrigeración que van desde 13,680 kWh hasta 13,987 kWh. Estas combinaciones de SC proporcionan un buen equilibrio entre rendimiento y costo de inversión en materiales aislantes.

Los sistemas con muros de thermorock (THK), logran reducir hasta en 19% la demanda de refrigeración contra el sistema con mayor carga; pero, la combinación THK-VC0, se muestra como una opción viable al reducir en 17% debido a la combinación de los valores U en la envolvente. Este sistema es ideal para climas extremos, ya que equilibra el control térmico con una inversión moderada en materiales aislantes, evitando así la necesidad de grosores excesivos para lograr una eficiencia óptima.

4.2.2 Eficiencia Energética estacional

El rendimiento de los sistemas constructivos varía significativamente entre las estaciones del año pues experimentan una mayor transmisión de calor en verano, lo que incrementa el costo energético en 96% en comparación a invierno. El balance anual se puede visualizar en la Figura 15.

La combinación LB1-SD2, que incluye muros de ladrillo con aislamiento y una cubierta también aislada, presenta un rendimiento térmico superior en comparación con BC0-VC2, debido a la relación muro-cubierta de 2.35 y la relevancia de aislar los muros sobre la cubierta. Además, LB1-SD2 tiene menor carga térmica en muros y cubierta, así como una temperatura interior más controlada. Por el contrario, BC0-VC2, con muros de bloque de concreto sin aislamiento, exhibe mayores cargas de enfriamiento debido a la mayor transferencia de calor, lo cual incrementa los costos energéticos y reduce el confort térmico en las temporadas cálidas.

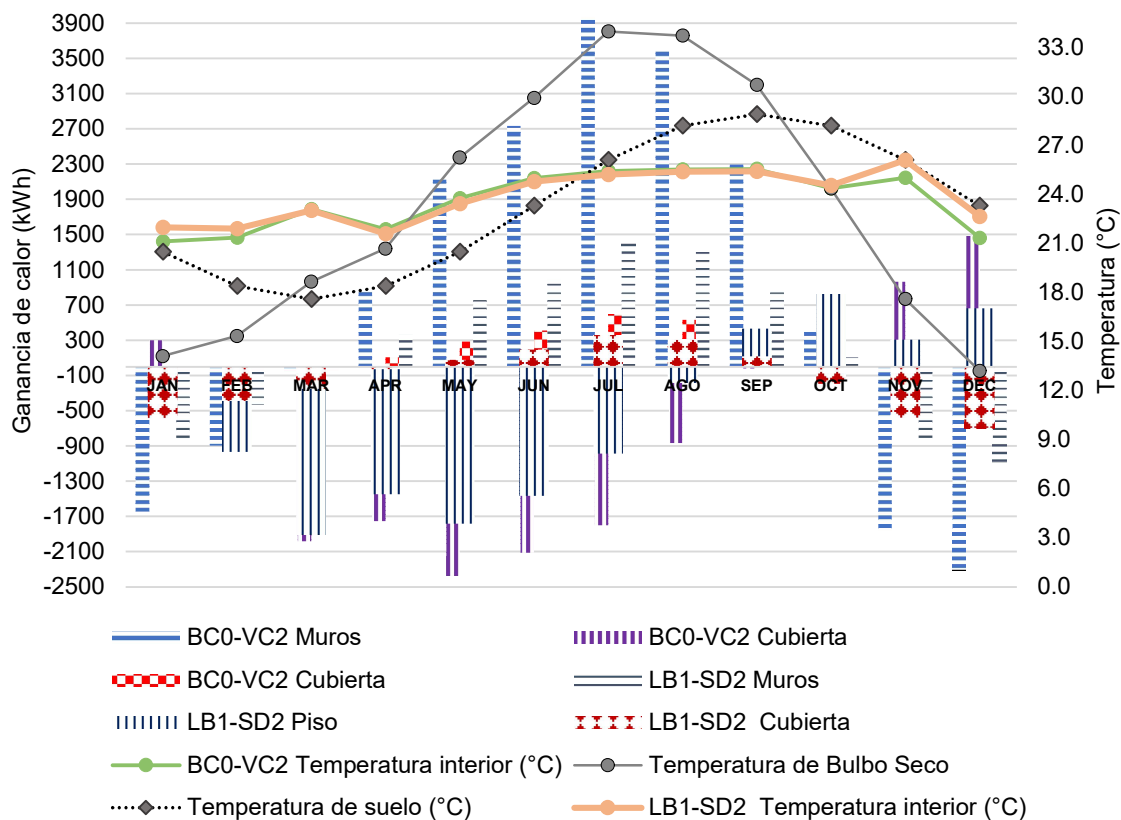
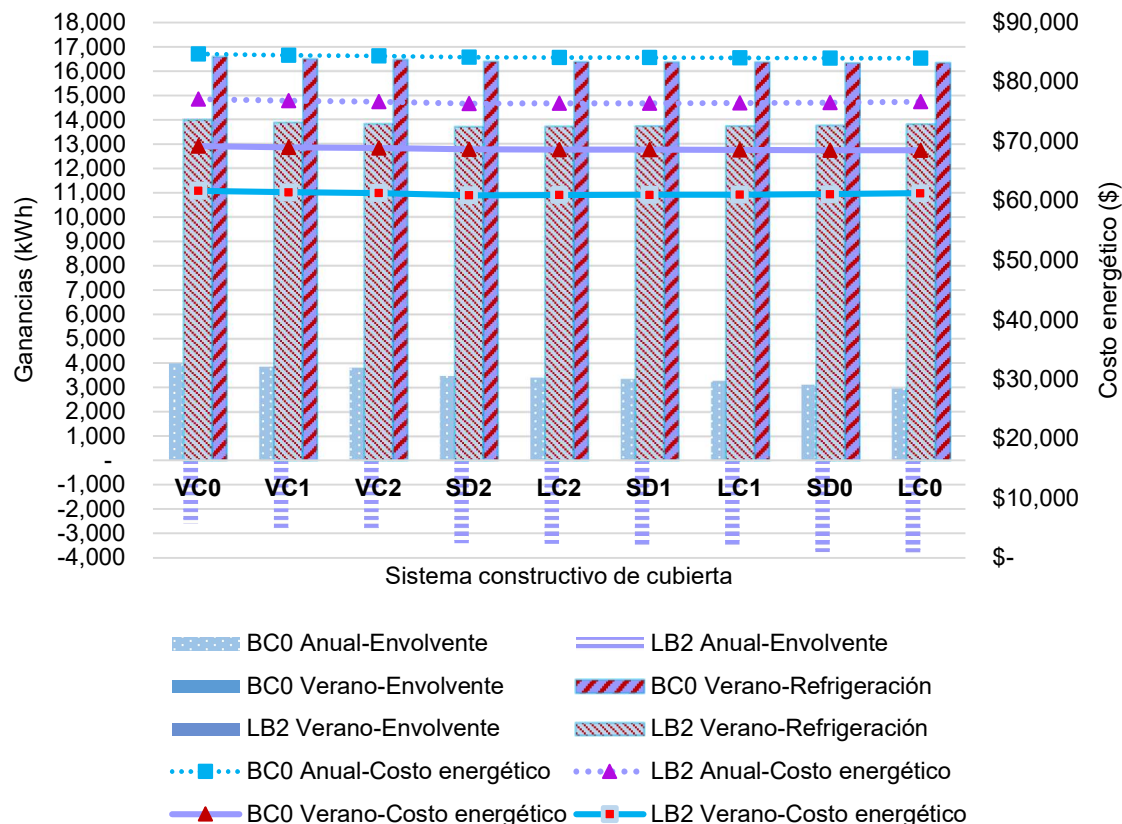


Figura 15. Eficiencia energética estacional: BC0-VC2 y LB1-SD2

Al analizar los datos de temporada de climatización y los datos anuales, se observa claramente que el 95% de consumo energético está asociado a la carga por refrigeración, como se observa en el ejemplo de la Figura 16.

Figura 16. Ganancias térmicas contra costo por refrigeración anual y de verano



La diferencia entre los muros BC0 y LB2 se debe a sus propiedades de aislamiento térmico, lo que impacta en su eficiencia energética. Los muros BC0, hechos de bloque de concreto, permiten una mayor transferencia de calor hacia el interior, especialmente en verano, lo que incrementa la demanda de energía para refrigeración y los costos energéticos. En cambio, los muros LB2, hechos de ladrillo de barro y con aislamiento adicional, reducen la entrada de calor, manteniendo temperaturas internas más estables y disminuyendo la necesidad de refrigeración.

En cuanto a los SC de cubierta, SD2 y LC2 son más eficientes en reducir las ganancias de calor, gracias a los 0.0508m de EPS, lo cual es fundamental en climas cálidos, especialmente en la temporada de verano, cuando las temperaturas exteriores son más altas. Estas cubiertas limitan la cantidad de calor que penetra en el edificio, lo que reduce la carga térmica interna y, por lo tanto, la necesidad de refrigeración. Las cubiertas con menor transmitancia térmica, como VC0 y VC1, permiten una mayor transferencia de calor desde el exterior hacia el interior, incrementando así la temperatura interna y, en consecuencia, el consumo energético para mantener el confort térmico en verano.

La elección de un sistema con propiedades de aislamiento adecuadas puede mitigar el incremento en la demanda de refrigeración y el costo energético durante el verano, sin necesidad de recurrir a un sobre aislamiento que pueda elevar los costos de construcción sin ofrecer una mejora significativa en la eficiencia térmica. Así pues, los sistemas con aislamiento de 0.508m en cubierta (como SD2 y LC2) logran equilibrar la reducción de las ganancias de calor sin incurrir en costos excesivos, optimizando la eficiencia energética tanto en la temporada estacional como en la operación anual del edificio.

4.4.3 Comparación de Temperatura Interior Promedio Entre Sistemas Constructivos.

Las temperaturas de superficie en el interior de los muros y techos impactan directamente en el confort percibido por los ocupantes. Los sistemas constructivos sin aislamiento como BC0, LB0, LC0, SD0 y VC0, registran temperaturas del aire interior entre los 23.4°C y 23.7°C; BC1, LB1, PEM, THK, LC1, SD1 y VC1 entre 23.7°C y 23.9°C; para BC2, LB2, THK, LC2, SD2 y VC2 entre 23.8°C y 24.0°C, esto se puede observar en la Tabla 18. La diferencia decimal de la temperatura entre cada capa de aislamiento que se añade es de 0.4°C promedio lo que se refleja en el consumo energético de cada combinación de SC.

Tabla 18. Ganancias en envolvente y temperatura interior de SC

Código	Ganancias por muro (kWh)	Ganancias por piso (kWh)	Ganancias por cubierta (kWh)	Temperatura interior (°C)	Costo energético (\$)	Carbono incorporado (kg)
BC0-LC0	11,219	- 5,906	- 4,872	23.4	84,016	227,277
BC1-LC0	3,453	- 4,533	- 5,123	23.5	76,725	227,835
BC2-LC0	2,052	- 4,206	- 5,167	23.5	74,709	228,393
LB0-LC0	9,652	- 5,811	- 4,950	23.4	82,857	55,340
LB1-LC0	3,274	- 4,580	- 5,154	23.5	76,680	55,898
LB2-LC0	1,990	- 4,220	- 5,179	23.5	74,918	56,456
PEM-LC0	4,319	- 3,942	- 5,011	23.4	79,426	35,418
THK-LC0	1,537	- 3,738	- 5,114	23.5	76,860	63,590
BC0-LC1	10,084	- 7,106	- 2,151	23.5	84,076	227,512
BC1-LC1	2,915	- 6,145	- 2,664	23.7	76,378	228,070
BC2-LC1	1,709	- 5,887	- 2,769	23.8	74,414	228,628
LB0-LC1	8,605	- 7,059	- 2,259	23.6	82,923	55,575
LB1-LC1	2,766	- 6,164	- 2,684	23.7	76,448	56,133
LB2-LC1	1,655	- 5,907	- 2,779	23.8	74,680	56,691
PEM-LC1	3,855	- 5,637	- 2,553	23.6	79,063	35,653
THK-LC1	1,275	- 5,559	- 2,817	23.8	76,373	63,825
BC0-LC2	9,737	- 7,476	- 1,266	23.6	84,127	227,747
BC1-LC2	2,739	- 6,668	- 1,790	23.8	76,337	228,305
BC2-LC2	1,592	- 6,461	- 1,899	23.9	74,337	228,863
LB0-LC2	8,280	- 7,450	- 1,373	23.6	82,953	55,810
LB1-LC2	2,597	- 6,694	- 1,810	23.8	76,394	56,368
LB2-LC2	1,540	- 6,484	- 1,908	23.9	74,506	56,926
PEM-LC2	3,705	- 6,187	- 1,669	23.7	79,011	35,888
THK-LC2	1,188	- 6,168	- 1,950	23.8	76,296	64,060

BC0-SD0	10,857	-	6,294	-	3,938	23.4	83,997	281,534
BC1-SD0	3,289	-	5,024	-	4,439	23.6	76,470	282,092
BC2-SD0	1,955	-	4,677	-	4,531	23.6	74,536	282,650
LB0-SD0	9,319	-	6,212	-	4,051	23.5	82,830	109,597
LB1-SD0	3,127	-	5,034	-	4,465	23.6	76,530	110,155
LB2-SD0	1,902	-	4,653	-	4,537	23.6	74,791	110,713
PEM-SD0	4,219	-	4,317	-	4,329	23.5	79,392	89,675
THK-SD0	1,471	-	4,205	-	4,474	23.6	76,697	117,847
BC0-SD1	10,011	-	7,187	-	1,908	23.5	84,095	281,769
BC1-SD1	2,716	-	6,738	-	1,667	23.8	76,315	282,327
BC2-SD1	1,678	-	6,039	-	2,535	23.8	74,382	282,885
LB0-SD1	8,526	-	7,157	-	2,009	23.6	82,931	109,832
LB1-SD1	2,719	-	6,309	-	2,443	23.8	76,416	110,390
LB2-SD1	1,624	-	6,060	-	2,546	23.8	74,559	110,948
PEM-SD1	3,847	-	5,682	-	2,351	23.7	79,085	89,910
THK-SD1	1,260	-	5,668	-	2,600	23.8	76,324	118,082
BC0-SD2	9,716	-	7,501	-	1,152	23.6	84,150	282,004
BC1-SD2	2,716	-	6,738	-	1,667	23.8	76,315	282,562
BC2-SD2	1,577	-	6,536	-	1,776	23.9	74,318	283,121
LB0-SD2	8,250	-	7,488	-	1,253	23.6	82,954	110,067
LB1-SD2	2,574	-	6,764	-	1,685	23.8	76,368	110,625
LB2-SD2	1,525	-	6,559	-	1,786	23.9	74,480	111,183
PEM-SD2	3,718	-	6,156	-	1,572	23.7	79,041	90,145
THK-SD2	1,185	-	6,196	-	1,842	23.8	76,264	118,317
BC0-VC0	9,325	-	7,963	-	240	23.6	84,718	270,257
BC1-VC0	2,526	-	7,354	-	32	23.8	77,091	270,815
BC2-VC0	1,446	-	7,219	-	78	23.9	75,130	271,373
LB0-VC0	7,889	-	7,969	-	173	23.7	83,535	98,320
LB1-VC0	2,388	-	7,394	-	47	23.9	77,125	98,878
LB2-VC0	1,398	-	7,244	-	86	23.9	75,302	99,436
PEM-VC0	3,516	-	6,900	-	98	23.8	79,706	78,398
THK-VC0	1,079	-	6,954	-	106	23.9	77,157	106,570
BC0-VC1	9,250	-	8,023	-	248	23.6	84,473	270,492
BC1-VC1	2,487	-	7,448	-	86	23.9	76,778	271,050
BC2-VC1	1,422	-	7,321	-	147	23.9	74,817	271,608
LB0-VC1	7,820	-	8,030	-	168	23.7	83,295	98,555
LB1-VC1	2,353	-	7,482	-	100	23.9	76,836	99,113
LB2-VC1	1,374	-	7,347	-	154	23.9	74,983	99,671
PEM-VC2	3,493	-	6,986	-	61	23.8	79,395	78,633
THK-VC2	1,058	-	7,099	-	185	23.9	76,722	106,805
BC0-VC2	9,217	-	8,052	-	265	23.6	84,382	270,727
BC1-VC2	2,469	-	7,495	-	100	23.9	76,645	271,285
BC2-VC2	1,410	-	7,372	-	167	24.0	74,658	271,843
LB0-VC2	7,789	-	8,061	-	182	23.7	83,212	98,790
LB1-VC2	2,336	-	7,529	-	114	23.9	76,704	99,348
LB2-VC2	1,362	-	7,398	-	174	24.0	74,822	99,906
PEM-VC2	3,482	-	7,024	-	48	23.8	79,269	78,868
THK-VC2	1,051	-	7,146	-	208	24.0	76,559	107,040

Esta reducción, mejora el confort térmico al reducir el efecto de emisión de calor desde las superficies hacia el interior, lo cual resulta en una percepción térmica más confortable y un menor consumo de los sistemas de enfriamiento. Sistemas constructivos como bloque y ladrillo, ganan efectividad al incorporarles aislamiento térmico ya que sus versiones con 0.025 m de aislamiento retardan la transferencia de calor al interior hasta en 2-3 horas en comparación con los sistemas sin aislamiento; lo que es especialmente

útil en condiciones de clima desértico, ya que permite que el calor se libere hacia el exterior durante las horas nocturnas, cuando las temperaturas exteriores son más bajas, contribuyendo a un ambiente interior más fresco durante el día.

La comparativa entre sistemas constructivos con y sin aislamiento evidencia que el uso de aislamiento, junto con materiales de baja masa térmica como Thermorock y panel de yeso, proporciona ventajas considerables en términos de reducción de la demanda de refrigeración, estabilidad energética estacional, confort térmico y control de la inercia térmica.

Los sistemas optimizados con aislamiento de 0.025 m logran reducir la carga de refrigeración en aproximadamente 12%, mejoran la estabilidad energética estacional al reducir las variaciones en consumo entre estaciones, y disminuyen las temperaturas del aire del espacio en 0.4°C (ver Tabla 18), lo cual mejora la sensación de confort. Además, el retraso térmico en sistemas de alta masa térmica con aislamiento muestra una ventaja adicional al ayudar a estabilizar las temperaturas interiores a lo largo del día. Estos resultados demuestran que la incorporación de aislamiento en edificios comerciales en climas desérticos es fundamental para maximizar la eficiencia energética y el confort.

Los resultados muestran que, sin aislamiento, los sistemas constructivos de bloque de concreto y ladrillo presentaron las mayores ganancias térmicas, alcanzando temperaturas interiores de 24.4°C a 24.6°C y un consumo energético anual de alrededor de 24,500 kWh. Por otro lado, los muros de THK y TEM registraron menores ganancias de calor, manteniendo temperaturas interiores entre 24.1°C y 24.3°C y un consumo energético promedio de 21,500 kWh/año.

Estos hallazgos destacan la importancia de la combinación de sistemas constructivos de alta y baja resistencia térmica en la envolvente, ya que las propiedades de cada material maximizan la eficiencia energética en climas cálidos. El Steel Deck en las cubiertas es especialmente eficiente al reducir las ganancias térmicas, y cuando se combina con muros con aislamiento térmico como THK o PEM, se logra una envolvente optimizada para reducir la carga de enfriamiento. Esta estrategia es clave para mantener el confort interior y minimizar el consumo energético en edificios ubicados en zonas de alta temperatura. En configuraciones con aislamiento, los resultados mejoraron significativamente. Al añadir 0.025 m de EPS, las ganancias térmicas se redujeron considerablemente ya que, para las combinaciones de muros de bloque de concreto y ladrillo, esta reducción de las ganancias de calor fue de aproximadamente un 15-20%,

debido a que la capa de aislamiento adicional ayudó a bloquear la entrada de calor de forma más efectiva.

En el caso de los muros construidos con Thermorock y panel de yeso, que son materiales de menor masa térmica y mayor capacidad aislante, la reducción en las ganancias térmicas fue aún mayor, alcanzando hasta un 30%. Esto se debe a que estos materiales ya tienen una resistencia térmica superior, y la adición de EPS optimizó aún más su capacidad para impedir el paso del calor. Como resultado de estas mejoras, en las configuraciones más eficientes, la temperatura interior promedio se mantuvo en un rango más controlado, entre 24.0°C y 24.2°C, lo que contribuye a un ambiente interior confortable sin requerir un consumo energético excesivo para refrigeración.

Las combinaciones que lograron hasta un 20% de reducción en el consumo energético anual fueron aquellas que utilizaron muros de Thermorock o panel de yeso, combinados con cubiertas de Steel Deck o losa de concreto, junto con una capa de 0.025 m de aislamiento de EPS. Estas configuraciones demostraron ser especialmente efectivas en reducir la carga térmica, permitiendo una disminución significativa en el consumo de energía en comparación con las configuraciones sin aislamiento. Este rendimiento se debe a la baja densidad y alta resistencia térmica de Thermorock y panel de yeso, que en combinación con el Steel Deck o la losa de concreto y el aislamiento, lograron limitar las ganancias térmicas y reducir la necesidad de climatización, optimizando así el consumo energético

En conclusión, el análisis comparativo demuestra que los sistemas constructivos que combinan Thermorock o panel de yeso con cubiertas de Steel Deck o losa de concreto, y un aislamiento de 0.025 m, representan la mejor opción para edificios comerciales en climas desérticos como el de Mexicali. Estas configuraciones no solo permiten reducir el consumo energético en hasta un 20%, sino que también mantienen un confort térmico adecuado para los ocupantes. Además, estos sistemas cumplen con los valores-U recomendados para Mexicali, lo que los convierte en opciones sostenibles al reducir el carbono incorporado y mejorar la eficiencia operativa del edificio a largo plazo.

4.4.4 Carbono incorporado

El análisis de carbono incorporado en los sistemas constructivos indica que el uso de materiales de alta densidad como el THK y PEM, contribuyen a reducir el total de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), por el contrario, las configuraciones con bloque de concreto y ladrillo, mostraron una mayor cantidad de CO_{2e} debido al uso intensivo de materiales con una alta huella de carbono, esto se puede apreciar en la Figura 17.

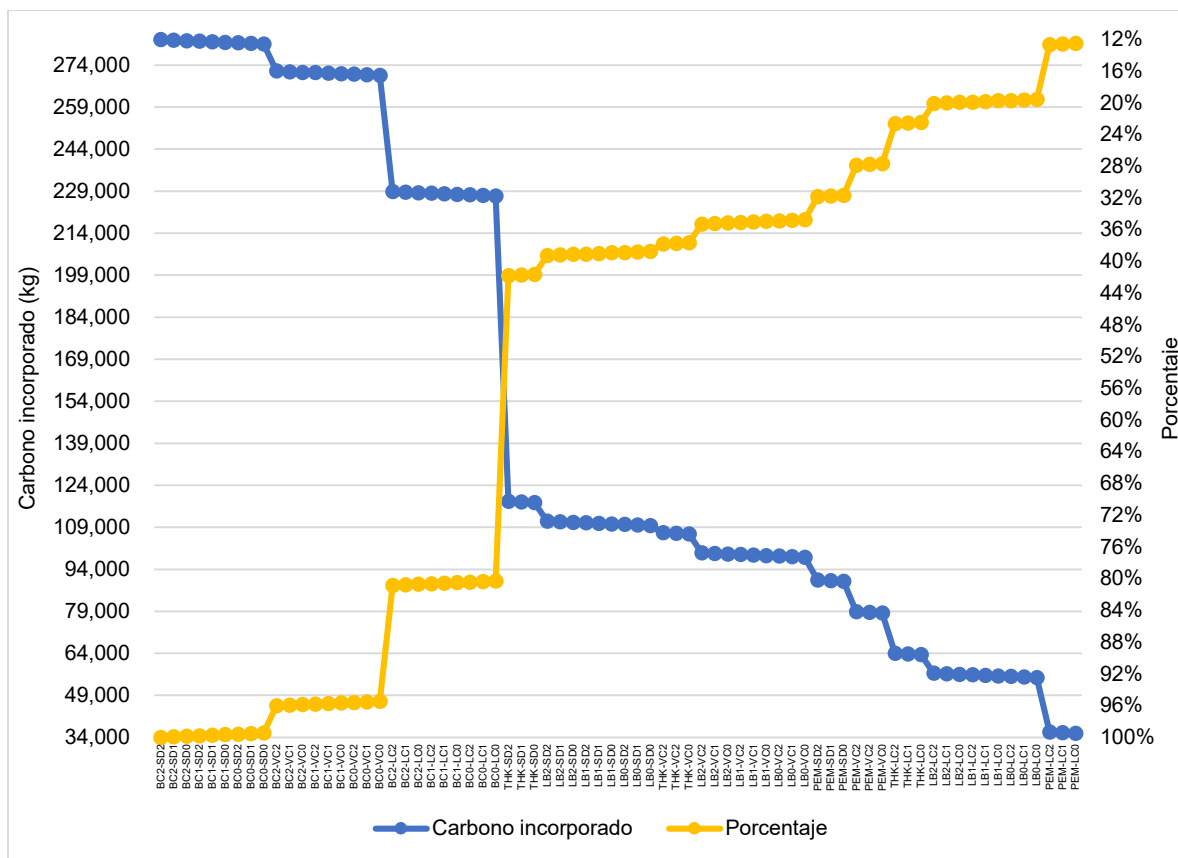


Figura 17. Reducción en CO₂ por sistema constructivo.

La tabla comparativa muestra variaciones notables en el CO₂e se observan la Tabla 18 del subapartado anterior, también se encuentran diferencias notables en el costo energético. La comparación entre sistemas constructivos con y sin aislamiento destaca cómo el uso de aislamiento en cubierta junto con SC en muro de alta densidad, como Thermorock y panel de yeso, ofrece beneficios notables en eficiencia energética, confort térmico y reducción de emisiones. En configuraciones optimizadas, el uso de un aislamiento de 0.025 m en cubierta permite reducir el consumo energético entre un 12% y un 15%, lo cual disminuye los costos de operación asociados a la climatización en climas extremos. Además, estos sistemas contribuyen al confort térmico interior, logrando una reducción de la temperatura interna entre 0.2°C y 0.4°C, lo cual se traduce en ambientes más habitables y con menores fluctuaciones térmicas.

Por otro lado, los SC que usan losa de concreto o vigueta caseton tienden a tener altos costos energéticos y niveles elevados de carbono incorporado debido a sus altas ganancias térmicas, lo cual incrementa el consumo por refrigeración.

Para un equilibrio entre eficiencia y sustentabilidad, sistemas como LB2-LC0 y LB2-LC2 destacan, ya que logran costos energéticos moderados y bajos niveles de CO₂

carbono. Estas configuraciones permiten un ahorro energético significativo sin depender de materiales que contribuyan significativamente al carbono incorporado, haciendo que estos SC sean opciones óptimas para reducir el impacto ambiental sin comprometer el rendimiento térmico.

4.2 Estudio Multiobjetivo

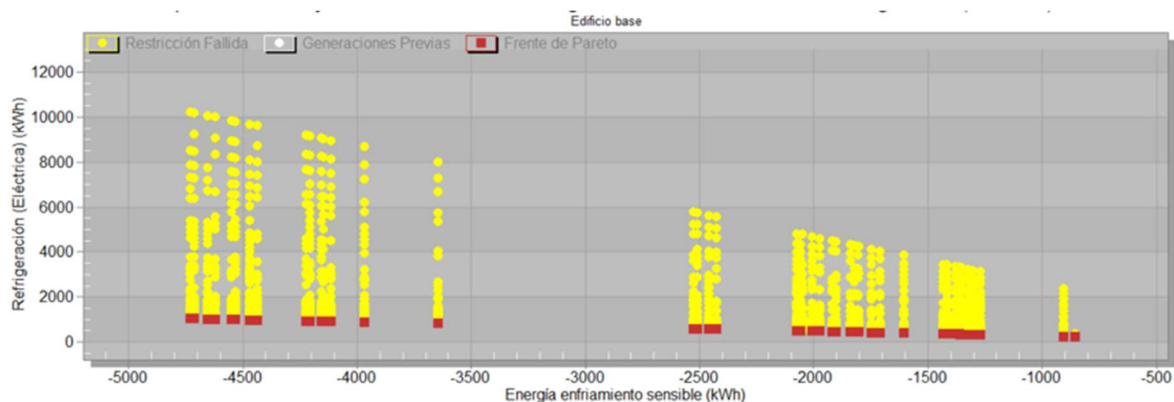
La simulación multiobjetivo evaluó el rendimiento de los sistemas constructivos en términos de eficiencia energética, calidad ambiental interior y reducción de dióxido de carbono (CO₂). Este análisis se centró en optimizar el confort térmico y minimizar el consumo energético en edificios comerciales ubicados en climas desérticos muy secos. A través del método de optimización por Pareto, se identificaron combinaciones de materiales y aislamientos que cumplen con estos objetivos de forma equilibrada.

4.2.1 Optimización por Frente de Pareto

La optimización por frente de Pareto permite obtener soluciones que representan una compensación óptima entre objetivos en conflicto, como el consumo energético y el confort térmico. Al analizar los resultados, se observa que las combinaciones de muros de THK o PEM con cubiertas de SD1 o LC1, ofrecen el mejor desempeño en eficiencia energética y calidad ambiental interior. Estas configuraciones logran reducir el consumo energético en un 20% y el carbono incorporado de 15-20%, en comparación con sistemas menos optimizados, como aquellos que utilizan BC0 o LB0.

El método de Pareto muestra que, al aumentar el aislamiento en estos sistemas, se mejora la eficiencia energética sin afectar significativamente el confort interior, alcanzando así una reducción importante en el consumo energético. Esta relación se visualiza mejor con un diagrama de Pareto (ver Figura 18) que ilustre las configuraciones óptimas y sus beneficios en términos de eficiencia energética y confort térmico.

Figura 18. Optimización por Frente de Pareto en simulación para refrigeración



4.2.3 Análisis de Sensibilidad

En el contexto de un análisis de sensibilidad para sistemas constructivos, se pueden evaluar cómo las variaciones en la resistencia térmica, el espesor del aislamiento y el tipo de material afectan el consumo energético, el confort térmico y el impacto ambiental. En el análisis de sensibilidad para sistemas constructivos, se observó cómo las variaciones en resistencia térmica, espesor de aislamiento y tipo de material impactan el consumo energético, confort térmico y huella de carbono de un edificio.

Al aumentar la resistencia térmica en los muros mediante el uso de materiales con alta inercia térmica o espesores de aislamiento, se reduce significativamente la ganancia y pérdida de calor, logrando en algunos casos una disminución del consumo de energía para refrigeración de hasta un 19%, como se observa en la transición de configuraciones sin aislamiento (BC0-LC0) a sistemas aislados (BC2-LC0). Los muros de concreto y ladrillo muestran menor sensibilidad a los cambios en el espesor de aislamiento, debido a su alta densidad, lo cual amortigua las fluctuaciones de temperatura sin reducir significativamente el consumo energético. En contraste, los sistemas ligeros, como los muros de PEM y THK, logran un mayor ahorro en consumo energético con menores espesores de aislamiento.

En cuanto a las cubiertas, las de tipo vigueta casetón resultan más eficientes en reducir las ganancias de calor en climas cálidos que las cubiertas SD0 o LC0. Sin embargo, las cubiertas de Steel Deck son más sensibles a la variación en el espesor de aislamiento, ya que logran mejorar la eficiencia energética al aumentar el aislamiento, en contraste con las cubiertas de alta masa térmica, que dependen menos de este ajuste. El confort térmico también está estrechamente ligado a la densidad y capacidad de retención de calor de los materiales: los sistemas de concreto y ladrillo absorben el calor durante el día y lo liberan durante la noche, manteniendo así temperaturas más estables. Esto resulta en un mejor confort térmico en climas con amplias variaciones de temperatura, como en Mexicali, donde en un día de verano la TBS puede alcanzar los 45°C y durante la noche bajar a 30°C. En contraste, los materiales de baja transmitancia térmica, como el PEM y el THK, que son excelentes aislantes, mantienen la temperatura más estable durante el día, pero limitan el enfriamiento nocturno, lo cual puede impactar el confort térmico al impedir la disipación de calor acumulado.

En conclusión, los resultados indican que el tipo de material de muro y el espesor de aislamiento son factores críticos para el rendimiento térmico y energético de un edificio. En climas cálidos, la combinación de cubiertas aisladas y muros ligeros ofrece la

mayor eficiencia. Sin embargo, para optimizar el confort y la eficiencia en entornos de variaciones térmicas diarias, los sistemas de alta inercia térmica, como los muros de concreto y ladrillo, pueden ser preferibles si se complementan con aislamiento adecuado. Este análisis de sensibilidad proporciona una guía para elegir combinaciones de materiales y espesores que optimicen tanto el confort como la eficiencia energética en función de las condiciones climáticas.

Tabla 19. Ganancias térmicas, confort y CO₂

Código	Ganancias por envolvente (kWh)	Enfriamiento Total	Temperatura Interior (°C)	Consumo por refrigeración (kWh)	Costo energético (\$)	Carbono incorporado (kg)
BC0-LC0	2,963	-48,151	23.4	16,322	84,016	227,277
BC1-LC0	-3,579	-40,871	23.5	13,854	76,725	227,835
BC2-LC0	-4,677	-39,130	23.5	13,264	74,709	228,393
LB0-LC0	1,423	-46,783	23.4	15,859	82,857	55,340
LB1-LC0	-3,840	-40,678	23.5	13,150	76,680	55,898
LB2-LC0	-4,765	-39,172	23.5	13,279	74,918	56,456
PEM-LC0	-1,978	-42,606	23.4	14,443	79,426	35,418
THK-LC0	-4,649	-40,023	23.5	13,567	76,860	63,590

En conclusión, el análisis de sensibilidad confirma que la combinación de cubiertas ligeras y muros con alta masa térmica puede ser una estrategia efectiva para lograr eficiencia energética y confort térmico en edificaciones ubicadas en climas cálidos. La incorporación de aislamiento adecuado, especialmente en sistemas de baja inercia como PEM y THK, permite mejorar el confort térmico sin incurrir en elevados costos energéticos. Estos hallazgos proveen una guía valiosa para optimizar la selección de materiales y espesores en proyectos de construcción sostenible, considerando tanto el confort de los usuarios como el rendimiento energético y el impacto ambiental del edificio.

4.2.4 Consumo Energético y Costo de energía

La simulación termo-energética también permitió analizar el consumo energético anual y mensual, y la distribución del uso de energía a lo largo del año, que permite identificar los periodos de mayor demanda. Los sistemas constructivos optimizados, en particular aquellos que se combinan con cubierta con capa de aislamiento extra como THK-SD1 o PEM-LC2, lograron reducir significativamente la demanda de energía durante los meses de verano, cuando las cargas de climatización son más elevadas. Debido a la relación muro-cubierta, estas configuraciones alcanzaron un consumo promedio de 21,000 kWh/año, mientras que los sistemas con bloque de concreto (BC0) y ladrillo (LB0)

presentaron un consumo promedio de 24,000 kWh/año debido a su menor capacidad para mitigar el calor en condiciones de alta carga térmica.

Los resultados de la simulación multiobjetivo subrayan la importancia de una selección adecuada de materiales y técnicas de construcción para maximizar la eficiencia energética y el confort térmico en climas desérticos muy secos. Las configuraciones que incluyen muros THK, PEM con SD1 o LC1, representan el balance más favorable entre eficiencia energética, confort térmico y reducción CO_2e , como se visualiza en la Tabla 19. Estas configuraciones cumplen con los valores-U recomendados para Mexicali y permiten reducir el consumo energético en un 20-25% en comparación con sistemas constructivos menos eficientes.

Estos hallazgos destacan que los materiales de baja masa térmica y alta resistencia térmica, como Thermorock (THK) y panel de yeso (PEM), son los más adecuados para climas cálidos, donde la eficiencia energética es prioritaria. La capacidad de estos materiales para reducir la demanda de energía de enfriamiento en verano los convierte en opciones óptimas para edificios comerciales en entornos desérticos. Además, el análisis de sensibilidad confirma que el aislamiento, aunque eficaz en todos los sistemas, es especialmente efectivo en aquellos con baja capacidad de almacenamiento térmico, maximizando su efecto en la envolvente.

4.5.2 Análisis de optimización

El análisis de optimización es una metodología avanzada que combina técnicas de simulación computacional con algoritmos de optimización para identificar configuraciones y estrategias óptimas en el diseño y operación de los edificios. Esto permite obtener resultados precisos al considerar múltiples variables y escenarios, optimizando el rendimiento energético del edificio; que, para este estudio, se busca determinar las mejores combinaciones de sistemas constructivos muro-cubierta a partir de una corrida de simulación.

Este análisis de optimización se diseñó específicamente para el periodo de mayor demanda de energía eléctrica, de abril a octubre, cuando el uso de sistemas de enfriamiento es esencial para mantener el confort térmico interior. La finalidad de este estudio es proporcionar recomendaciones concretas para elegir sistemas constructivos (SC) que, además de reducir el consumo energético en temporadas críticas, también disminuyan el impacto ambiental a través de un menor CO_2e . Al evaluar el consumo eléctrico por refrigeración y de carbono incorporado, junto con la temperatura interior

promedio de este periodo, se busca facilitar la toma de decisiones para adoptar prácticas constructivas sostenibles y eficientes en climas cálidos.

De las 69 combinaciones constructivas, se obtuvieron 12 soluciones óptimas: tres LB1, cuatro LB2, tres PEM y dos BC2; por otro lado, los SC para cubierta: tres LC0, tres LC1, cuatro LC2 y dos SD2. Los valores estimados para cada alternativa se pueden observar en la Tabla 20, con el orden de eficiencia de la variable, considerando el de puntuación 1 la más eficiente, además de la 2 y 3 como alternativas para identificar la solución más viable acorde al proyecto. Asimismo, también se muestra la estimación para la combinación NOM-008 que representa los Valor U que la NOM-008-STPS-2008 establece para el caso de estudio.

Tabla 20. Descriptivo de soluciones optimas multiobjetivo

Código	Carbono incorporado (kg)	Consumo por refrigeración (kWh)	Temperatura interior (°C)	Puntuación CO2	Puntuación kWh	Puntuación °C
BC2-LC2	228,863.4	13,129.6	24.25	11	2	6
BC2-SD2	283,120.5	13,119.4	24.25	12	1	6
PEM-LC0	35,417.6	14,443.3	24.09	1	12	1
PEM-LC1	35,652.7	14,316.5	24.13	2	11	2
PEM-LC2	35,887.7	14,296.5	24.14	3	10	3
LB1-LC0	55,898.2	13,785.5	24.30	4	9	7
LB1-LC1	56,133.2	13,703.3	24.32	5	8	8
LB1-LC2	56,368.2	13,683.2	24.33	6	7	9
LB2-LC0	56,456.3	13,276.0	24.23	7	6	4
LB2-LC1	56,691.3	13,170.9	24.24	8	5	5
LB2-LC2	56,926.4	13,139.9	24.25	9	4	6
LB2-SD2	111,183.5	13,131.7	24.25	10	3	6
NOM-008	27,999.7	14,644.6	24.51	0	0	0

La mayor eficiencia energética se da con BC2-SD2, pues se estimó un consumo energético de 13,119.4 kWh; esta combinación de SC tiene una alta resistencia térmica debido al aislamiento de 0.0508 m en muros y cubierta; sin embargo, la incorporación de EPS en esta combinación de SC representa la de mayor contenido de CO₂ incorporado en los materiales con 283,120.5 kg.

Por el contrario, el menor ahorro energético se obtiene con PEM-LC0, esta combinación de sistemas constructivos sin EPS tiene un consumo energético de 14,443 kWh, y los materiales cuentan con 35,417 kg de CO₂e, posicionándola como la opción de menos contaminante en su proceso de fabricación. Esto representa para PEM-LC0, 9% más consumo energético que BC2-SD1; pero 87% menos carbono incorporado.

Al comparar BC2-SD2 con LB2-SD2, el consumo energético es de 13,131 kWh, esto representa 0.01% más consumo energético al cambiar a muros de ladrillo con 0.0508 m EPS, sin embargo, el carbono incorporado en los materiales disminuyen en 61%; lo que indica que el EPS no es el único factor por considerar en la selección de un material más sostenible, si no, que los procesos de extracción y producción de su materia prima, el transporte asociado al traslado del material, así como la durabilidad y posibilidad de reciclaje del mismo influye en su balance de emisiones de CO₂ (Kairies-Alvarado et al., 2021).

Un comportamiento similar tienen BC2-LC2, LB2-LC2 y LB1-LC2 combinaciones de SC que tienen consumos energéticos similares a BC2-SD2 (0.1%, 0.2% y 4.3% más consumo respectivamente), pero con aportaciones de carbono incorporado de 19% menos con muros de bloque y 80% menos con muros de ladrillo; esto debido a que los materiales de una losa de concreto tienen menos carbono incorporado que una losa de Steel Deck.

Ahora bien, al disminuir en 0.0254 m el aislamiento de LB2-LC2 a LB1-LC1, el consumo energético aumenta en 5% contra la opción más eficiente, pero comparado con la combinación con mayor aportación de carbono incorporado, ambos reducen en 80% el carbono incorporado. Esto indica que el incremento de aislamiento EPS, no representa ahorros energéticos significativos, ni menos CO_{2e}, pero sí, una mayor inversión en el costo de construcción.

De igual manera, al quitar el aislamiento de la losa de concreto en la combinación con muro de ladrillo, la combinación LB1-LC0 tiene 5.1% más energía que BC2-SD2 y 80% menos carbono incorporado, mientras que con LB2-LC0, se tiene solo 1.2% más energía, pero con el beneficio de reducir en 80% la cantidad total de carbono de los materiales, lo que nos indica un pequeño beneficio energético al aplicar las 0.0508 m de EPS. Finalmente, las opciones con muros de estructura metálica: PEM-LC0, PEM-LC1 y PEM-LC2 representan 9% más consumo energético, pero 87% menos aportación de carbono incorporado contra BC2-SD2.

Es importante mencionar que la consigna de temperatura para el sistema de refrigeración es de 24°C, sin embargo, entre las distintas variables si hay diferencia en la temperatura interior, aquel más cercano a la consigna lo logra la combinación PEM-LC0 con 24.09 °C, misma que es la de menor carbono incorporado de la tabla, pero la de mayor consumo energético por refrigeración, esto debido a la combinación de muros con un bajo Valor U pero cubierta con alto Valor U. El agregar EPS a la losa de concreto en la

combinación con muros PEM, se mejora la temperatura en 0.4°C para PEM-LC1 y 0.5°C con PEM-LC2, sin embargo, estas opciones tienen 1% menos consumo energético, pero 1% más carbono incorporado, lo que indica que el aislamiento EPS para estos casos no tiene mejoras significativas para el consumo energético o carbono incorporado.

Para los casos de muros LB2 con LC0 y LC1, la temperatura interior para la temporada es de 24.23°C y 24.24°C respectivamente, pero con 8% y 9% menos consumo energético respecto a PEM-LC0. Además, para los casos con 0.0508 m de EPS en muros de bloque y ladrillo combinados con 0.0508 m EPS en Steel Deck y losa de concreto, representan una temperatura interior de 24.25°C , la relación entre la aportación de carbono por consumo energético y la aportación de carbono incorporado de materiales es inversa, pero en estos cuatro casos, la mejor alternativa sería con LB2-LC2 ya que la aportación de carbono incorporado representa 80% menos CO_2e con una diferencia de 564 kWh contra BC2-SD2.

Finalmente, los tres casos con mayor temperatura interior para la temporada abril-octubre, se dan con LB1 y las alternativas con losa de concreto, particularmente LB1-LC1 se sitúa con 24.33°C , que representa 0.23°C más que con PEM-LC2, esto genera un mayor trabajo para el sistema de refrigeración lo que aumenta el consumo energético 8.5%, y el carbono incorporado en 37%; aun así, esta alternativa se sitúa en la quinta posición de 12 para carbono incorporado y en la octava para consumo energético y temperatura interior.

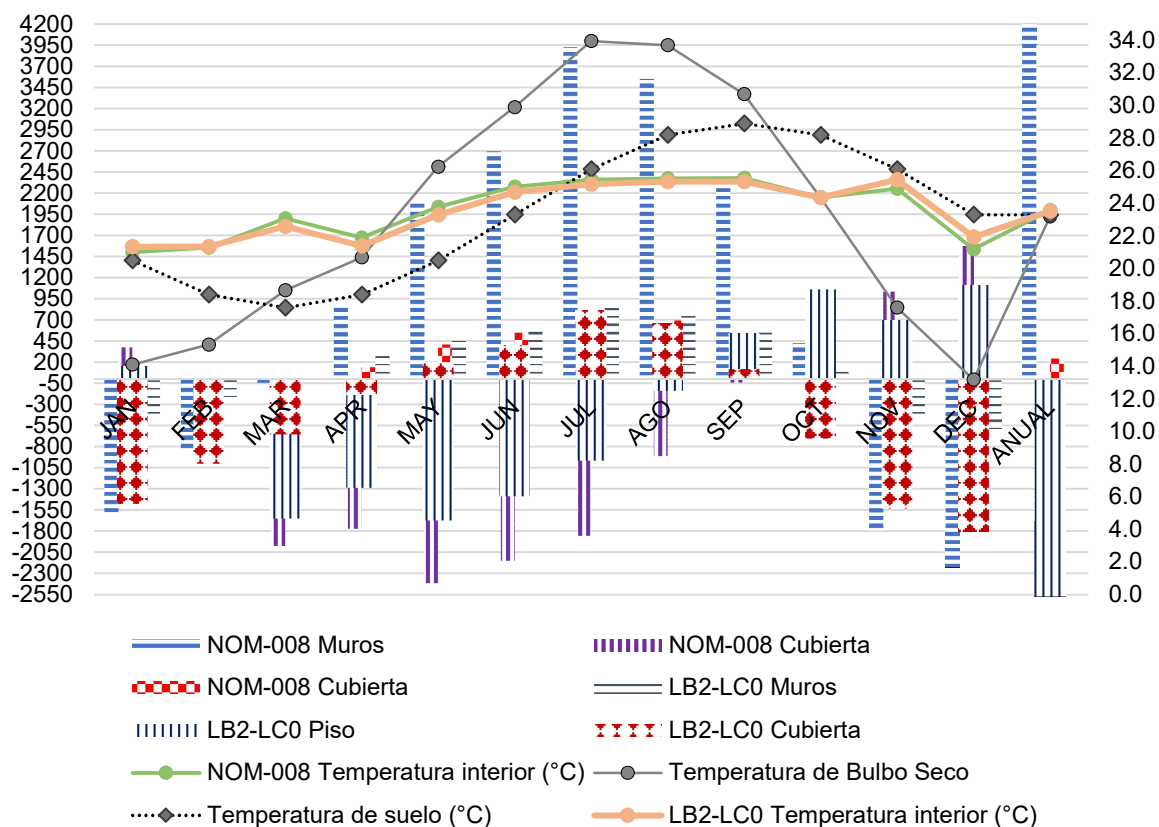
Es pues, que derivado de este análisis, las opciones más viables para sistemas constructivos, sería la de muros de ladrillo con EPS (LB1 y LB2) y cubierta de concreto (LC0, LC1 y LC2), esto debido a que son los materiales que tienen menos carbono incorporado, pero mantienen buena eficiencia energética.

En particular la opción LB1-LC0, tiene una mayor ventaja debido a la relación muro-cubierta, ya que aplica el aislamiento en el elemento que mayor aportación de calor tiene a la envolvente, lo que beneficia al consumo energético y el total de carbono de los materiales, con un 80% menos $\text{kg CO}_2\text{e}$ y 5% menos consumo energético contra las opciones menos eficientes de la lista.

En la Figura 19, se puede observar el balance energético anual con la TBS, temperatura de suelo and temperatura interior para LB1-LC0 y NOM-008, sus Valor U para muro-cubierta son $0.867 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ - $0.2419 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y $0.521 - 0.354 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ respectivamente, a pesar de que la combinación NOM-008 tiene mejor transmitancia

térmica , LB2-LC1 9% menos consumo energético por refrigeración y 1% menor temperatura interior para la temporada abril-octubre.

Figura 19. Balance energético de la mejor combinación contra la NOM-008



El análisis de optimización identifica que las combinaciones de sistemas constructivos con muros de ladrillo y cubiertas de losa de concreto aisladas, particularmente la opción LB1-LC0, representan la mejor alternativa para edificios comerciales en climas cálidos y desérticos como el de Mexicali, Baja California. Esta configuración ofrece una reducción del consumo energético hasta en un 9% y un 80% menos de carbono incorporado en comparación con opciones menos eficientes, al emplear materiales de alta masa térmica en la envolvente. Estos resultados subrayan la importancia de balancear resistencia térmica y cantidad total de carbono para optimizar el rendimiento ambiental y energético en edificios comerciales, proporcionando una base concreta para decisiones de diseño sostenibles.

4.5 Recomendaciones de Diseño

En el diseño de edificaciones en climas cálidos, es esencial adoptar estrategias que reduzcan la carga térmica y el consumo energético, especialmente durante los meses

de verano. Las recomendaciones de diseño presentadas aquí se centran en integrar prácticas y materiales que mejoren la eficiencia térmica de los edificios, optimizando el confort interior y reduciendo el impacto ambiental.

Estas estrategias incluyen el uso de aislamiento en sistemas constructivos, la selección de materiales con baja conductividad térmica, la optimización de la combinación entre muros y cubierta, y la implementación de estrategias pasivas de diseño. Al aplicar estas recomendaciones, se logra minimizar la transferencia de calor hacia el interior, estabilizar la temperatura interna y reducir la demanda de energía para refrigeración, lo cual se traduce en menores costos energéticos y un mejor desempeño ambiental del edificio.

Las recomendaciones para el diseño se enfocan en optimizar la eficiencia energética y mejorar el confort térmico mediante diversas estrategias. En primer lugar, el uso de aislamiento en los sistemas constructivos, preferiblemente de 0.025 m, es fundamental para reducir las ganancias térmicas y los costos energéticos durante el verano, al minimizar la transferencia de calor hacia el interior.

En segundo lugar, la selección de materiales con baja conductividad, como Thermorock (THK) y paneles de yeso (PEM), proporciona un mejor rendimiento térmico en comparación con materiales como el concreto (BC0) y ladrillo (LB0), lo que permite mantener temperaturas interiores más estables y reducir la demanda de energía para refrigeración. Además, es esencial optimizar la combinación de muros y cubiertas, favoreciendo sistemas que combinen muros de baja densidad con aislamiento con cubiertas de alta resistencia térmica, lo cual reduce las ganancias de calor y, en consecuencia, el costo energético.

La evaluación del costo energético también es relevante; el diseño arquitectónico debe priorizar materiales de baja conductividad y aislamiento adecuado, siendo el uso de THK o PEM una estrategia efectiva para minimizar la transferencia de calor y estabilizar la temperatura interior.

Por otra parte, las cubiertas de Steel Deck con aislamiento como SD1 y SD2 también son recomendables para disminuir la transmisión de calor en techos expuestos al sol. Finalmente, la implementación de estrategias pasivas, como la ventilación natural y el sombreado en áreas con mayor ganancia térmica, optimiza aún más el costo energético y mejora el confort interior en los meses de alta demanda de refrigeración.

Capítulo 5: Conclusiones

La presente investigación ha cumplido con el objetivo de optimizar el diseño de la envolvente arquitectónica en edificios comerciales situados en climas desérticos muy secos. A través de simulaciones dinámicas multiobjetivo, se identificaron combinaciones constructivas que reducen el consumo energético, el carbono incorporado y garantizan condiciones de calidad ambiental interior adecuadas.

Este proceso de optimización respondió satisfactoriamente a las preguntas de investigación planteadas, y demostró cómo los materiales y sistemas constructivos influyen directamente en el rendimiento energético del edificio, lo cual tiene implicaciones significativas en términos de eficiencia y sostenibilidad.

La investigación abordó la pregunta principal de manera rigurosa y metodológica, y exploró el impacto de distintas técnicas de adecuación ambiental en la eficiencia energética y la calidad del entorno interior. A través de simulaciones avanzadas y análisis comparativos, fue posible observar una clara correlación entre las propiedades térmicas de los materiales y su impacto en el balance energético del edificio.

Así, se confirma la hipótesis inicial, que planteaba que el uso de simulaciones dinámicas multiobjetivo facilita la identificación de técnicas de adecuación ambiental optimizadas, aplicables a edificios comerciales en climas desérticos muy secos. Los resultados obtenidos demuestran que es posible lograr un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y confort interior mediante la selección de materiales y estrategias constructivas adecuadas para condiciones extremas de estos climas.

En relación con los objetivos específicos de la investigación, se alcanzaron logros importantes:

1. Determinación de técnicas de adecuación ambiental mediante análisis multiobjetivo en simulación dinámica avanzada: Se identificaron configuraciones específicas de muros y cubiertas que ofrecen un rendimiento térmico superior, en particular al emplear materiales de baja masa térmica y alta resistencia térmica, como el Thermorock y el panel de yeso. Estos materiales mostraron alta efectividad para reducir las ganancias térmicas en los periodos de mayor demanda de enfriamiento, lo cual se traduce en menor dependencia de los sistemas de climatización y, en consecuencia, en un ahorro energético sustancial.
2. Estimación de la eficiencia energética y ambiental de las adecuaciones multiobjetivo para edificios comerciales en climas desérticos muy secos:

Los resultados de las simulaciones revelaron que las combinaciones constructivas que integran aislamiento en muros y techos junto con materiales de baja conductividad térmica muestran un mejor rendimiento en términos de eficiencia energética. Estas configuraciones permitieron reducir el consumo energético en un promedio del 20% y disminuyeron el total de dióxido de carbono equivalente que genera mayor sostenibilidad en el diseño de edificios comerciales.

3. Clasificación en una guía de soluciones multiobjetivo de las técnicas de adecuación ambiental para edificios comerciales en climas desérticos muy secos: Los datos obtenidos permitieron establecer una clasificación de las combinaciones constructivas según su desempeño energético y ambiental, proporcionando una guía práctica y detallada para seleccionar materiales y sistemas constructivos de acuerdo con los requerimientos específicos de eficiencia y confort para climas desérticos.

La aportación principal de esta investigación radica en el desarrollo de un marco de referencia para la optimización de sistemas constructivos en edificios comerciales, que emplea herramientas avanzadas de simulación para obtener datos precisos sobre el comportamiento térmico y energético de diversas combinaciones constructivas. Este estudio proporciona una base sólida para la selección de materiales y técnicas que optimicen el consumo energético y el confort interior, lo cual no solo representa un beneficio económico para los propietarios, sino que también contribuye a los objetivos de sostenibilidad mediante la reducción de carbono incorporado y el impacto ambiental de las edificaciones. Además, la investigación ofrece un enfoque replicable aplicable en otros contextos de climas extremos, ampliando las posibilidades de diseño sostenible en la arquitectura comercial.

El análisis de los datos recopilados en las simulaciones termo-energéticas y ambientales demostró la gran influencia de las características de los materiales en el balance térmico y en el consumo energético de edificios comerciales en climas desérticos. Los resultados indican que la combinación de muros y cubiertas con distintos valores de transmitancia térmica (valor-U) tiene un impacto directo en las ganancias y pérdidas de calor a lo largo del año. La variabilidad en las ganancias de calor de los muros y la disipación de calor hacia el suelo resalta la importancia de la selección de materiales con propiedades térmicas adecuadas para optimizar el confort interior y minimizar la demanda de energía para climatización.

La conclusión general de este apartado es que los sistemas constructivos con valores-U elevados para cubiertas y bajos para muros ofrecen mejores resultados en términos de confort térmico, ya que logran reducir las ganancias de calor y optimizar el balance energético de la envolvente.

El análisis comparativo de los diferentes sistemas constructivos confirmó que los materiales de baja masa térmica y alta resistencia térmica, como el Thermorock y el panel de yeso, ofrecen un rendimiento superior en climas desérticos, especialmente cuando se combinan con cubiertas de alta eficiencia, como el Steel Deck con aislamiento de EPS. Estos materiales demostraron una reducción significativa en las ganancias térmicas y en el consumo energético anual en comparación con sistemas convencionales, como el bloque de concreto y el ladrillo sin aislamiento. La eficiencia de estas configuraciones muestra que el uso de materiales con bajo valor-U, combinados con técnicas de aislamiento adecuadas, permite una reducción en el consumo energético de hasta un 20% en comparación con alternativas menos optimizadas.

En conclusión, el uso de materiales optimizados y combinaciones constructivas adecuadas es esencial para alcanzar un rendimiento energético eficiente y un confort térmico adecuado en edificios comerciales en climas áridos.

La simulación multiobjetivo reveló que es posible optimizar el diseño de la envolvente del edificio para lograr un equilibrio entre eficiencia energética, carbono incorporado y confort térmico. Las combinaciones óptimas identificadas mediante el análisis de Pareto incluyeron muros de ladrillo y Thermorock junto con cubiertas de concreto y panel estructural, lo cual generó una eficiencia energética significativamente superior en comparación con las alternativas sin optimización. Estas combinaciones lograron una reducción del consumo energético en un promedio del 20%, además de una disminución en CO_2e .

La conclusión es que el uso de técnicas de optimización y simulación multiobjetivo permite identificar configuraciones constructivas que satisfacen los requerimientos de sostenibilidad y eficiencia en condiciones climáticas extremas, haciendo posible alcanzar los objetivos ambientales y de confort.

El análisis comparativo entre sistemas con y sin aislamiento demostró la importancia de incorporar materiales aislantes en la envolvente de los edificios para mejorar el rendimiento térmico y reducir la demanda de energía. Los sistemas con aislamiento mostraron una disminución de hasta el 12% en el consumo energético anual, además de una menor variabilidad en el confort térmico estacional, manteniendo

temperaturas interiores más estables durante todo el año. Asimismo, las temperaturas de superficie interior en muros y techos disminuyeron en promedio entre 2-3°C, lo cual mejora la percepción de confort en el espacio interior.

La conclusión es que la implementación de aislamiento en sistemas constructivos es una estrategia fundamental en climas desérticos, ya que permite reducir el consumo energético y mejorar las condiciones de confort, además de aportar una mayor estabilidad en el rendimiento energético a lo largo de las distintas estaciones.

A partir del análisis de optimización y de correlación entre los resultados energéticos y las ganancias térmicas, se destacan varias recomendaciones de diseño que son cruciales para maximizar la eficiencia energética y minimizar los costos operativos en edificios comerciales ubicados en climas desérticos muy secos. Se recomienda el uso de materiales aislantes, preferiblemente de 0.025 m o 0.05 m de espesor, para reducir significativamente las ganancias térmicas de verano y optimizar el consumo de energía. Además, la selección de materiales de baja conductividad, como el Thermorock y el panel de yeso, en combinación con cubiertas de alta resistencia térmica, proporciona un rendimiento superior en términos de control térmico y reducción de costos.

Estas recomendaciones se basan en la observación de que las configuraciones con menor ganancia térmica y menor costo energético en verano ofrecen mejores condiciones de confort interior sin sobrecargar los sistemas de climatización. La conclusión general es que una adecuada selección de materiales, junto con la implementación de aislamiento y el uso de estrategias pasivas, permite optimizar el diseño de la envolvente para maximizar la eficiencia energética y mejorar las condiciones ambientales interiores.

Aunque esta investigación ha alcanzado resultados significativos, se identificaron limitaciones que sugieren áreas de mejora para futuras investigaciones. Algunas recomendaciones clave son:

- Incluir un análisis más detallado de las variaciones estacionales: El estudio se enfocó en periodos de alta carga térmica, como el verano; sin embargo, la consideración de periodos intermedios y de menor demanda de refrigeración permitiría una visión más integral de las necesidades energéticas a lo largo del año. Esto ayudaría a desarrollar estrategias de diseño más adaptativas, que consideren las transiciones climáticas de manera efectiva.

- Explorar otros materiales y tecnologías constructivas avanzadas: En esta investigación, se seleccionaron materiales convencionales y conocidos en la construcción, como el bloque de concreto, ladrillo, Thermorock y paneles de yeso. No obstante, la incorporación de materiales innovadores, como los de cambio de fase (PCM) o el uso de aislantes ecológicos y reciclables, podría ofrecer alternativas aún más eficientes y sostenibles. Estos materiales pueden mejorar el rendimiento térmico sin sacrificar la sostenibilidad, a la vez que minimizan la cantidad de dióxido de carbono equivalente.
- Incorporar un análisis de costo-beneficio exhaustivo: La investigación se centró en la eficiencia energética y el confort, pero la simulación debería complementarse con un análisis económico detallado que contemple el costo inicial de implementación de cada sistema constructivo y el ahorro energético a largo plazo. Esto proporcionaría una perspectiva económica que facilitaría la toma de decisiones a los inversionistas y propietarios de edificios comerciales, permitiéndoles evaluar la viabilidad económica de cada alternativa en términos de inversión y retorno.
- Evaluar el impacto de la vida útil de los materiales: La investigación se enfocó en el rendimiento térmico y energético a corto y mediano plazo. Sin embargo, la incorporación de un análisis de durabilidad y mantenimiento de los materiales utilizados podría enriquecer los resultados. Comprender cómo se degradan los materiales y cómo esto afecta al rendimiento térmico permitiría ajustar las recomendaciones para maximizar la eficiencia a lo largo del ciclo de vida del edificio.

La investigación realizada abre nuevas oportunidades para optimizar la envolvente de edificios en climas extremos. La metodología de simulación multiobjetivo empleada en este estudio demuestra ser aplicable a una variedad de contextos arquitectónicos, con la posibilidad de desarrollar soluciones de diseño que maximicen la eficiencia energética, el confort interior, al mismo tiempo que reducen el total de carbono del material. Esto no solo beneficia a los usuarios y propietarios de los edificios, sino que también contribuye al avance del diseño sostenible en la arquitectura comercial. Futuros estudios podrían ampliar este enfoque, explorando diferentes configuraciones de materiales y técnicas constructivas para otros tipos de edificios, como residenciales y de uso mixto, en diversos

climas y regiones, adaptando las recomendaciones aquí generadas a contextos específicos.

En resumen, la presente investigación proporciona un enfoque práctico, sostenible y económicamente viable para optimizar la eficiencia energética y el confort en edificios comerciales en climas desérticos muy secos. Los hallazgos marcan un avance significativo en la comprensión y aplicación de técnicas de adecuación ambiental en la arquitectura, promoviendo prácticas de diseño más sostenibles y adaptativas a las condiciones climáticas extremas.

Referencias

- Afroz, Z., Shafiullah, G., Urmee, T., y Higgins, G. (2017). Prediction of Indoor Temperature in an Institutional Building. *Energy Procedia*, 142, 1860–1866.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.576>
- Agencia de Protección Ambiental [EPA]. (2016). *Fundamentos del índice de la calidad del aire (AQI)*. https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi_sp
- Agencia Internacional de Energía [IEA]. (2024). *World energy balance*. IEA.
<https://www.iea.org/countries/mexico>
- Ahmed, T., Kumar, P., y Mottet, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110669.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>
- Alexander, C. (1971). *La estructura del medio ambiente*. Tusquets Editores.
- Alger, J. R. M. (1964). *Creative synthesis in design*. Prentice-Hall; Harvard Library Bibliographic Dataset.
<http://libcon.rec.uabc.mx:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edshlc&AN=edshlc.007044274.6&lang=es&site=eds-live>
- Amodio, M., Dambruoso, P., Gennaro, G., Gennaro, L., Loiotile, A., Marzocca, A., Stasi, F., Trizio, L., y Tutino, M. (2014). Indoor air quality (IAQ) assessment in a multistorey shopping mall by high-spatial-resolution monitoring of volatile organic compounds (VOC). *Environmental Science & Pollution Research*, 21(23), 13186–13195. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2544-1>
- Archer, L. B. (1968). *The structure of design processes*. British Library EThOS.
<http://libcon.rec.uabc.mx:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsble&AN=edsble.697935&lang=es&site=eds-live>
- Ariza, V. (1968). El Diseño como objeto de estudio y como ejercicio de intervención. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, 82, 46–68. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi82.3713>
- Arribas Castañeyra, J. (2015). *CONTRIBUCIONES A LA OPTIMIZACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS*. UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.
- Arroyo, J. A., y Ojeda, E. (2019). Implementación de mejora para incrementar la productividad en el proceso de reparación mecánica de equipos de aire acondicionado en un edificio administrativo de una empresa financiera, Lima, 2016

- y 2017. *Universidad Privada del Norte*.
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21277>
- Asdrubali, F., y Desideri, U. (Eds.). (2019). Chapter 3—From Efficient to Sustainable and Zero Energy Consumption Buildings. En *Handbook of Energy Efficiency in Buildings* (pp. 75–205). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00038-3>
- Asimow, M. (1968). *Introducción al proyecto* (TA174 A85). Herrero Hermanos.
- Attia, S. (2018). Chapter 12—Roadmap for NZEB Implementation. En S. Attia (Ed.), *Net Zero Energy Buildings (NZEB)* (pp. 343–369). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812461-1.00012-5>
- Ballarini, I., De Luca, G., Paragamyan, A., Pellegrino, A., y Corrado, V. (2019). Transformation of an Office Building into a Nearly Zero Energy Building (nZEB): Implications for Thermal and Visual Comfort and Energy Performance. *Energies*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/en12050895>
- Banacloche, S., Cadarso, M. A., Monsalve, F., y Lechon, Y. (2020). Assessment of the sustainability of Mexico green investments in the road to Paris. *Energy Policy*, 141, 111458. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111458>
- Barea, G., Victoria Mercado, M., Filippín, C., Monteoliva, J. M., y Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266, 112100. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., y Banerjee, J. (2020). Evaluation of cooling potential of passive strategies using bioclimatic approach for different Indian climatic zones. *Journal of Building Engineering*, 31, 101356. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101356>
- Blaxter, L., Hughes, C., y Tight, M. (2007). *Cómo se hace una investigación*.
- Bougrine, S., y Gosselin, L. (2023). Multi-objective optimization of ceiling-to-floor systems in timber buildings taking into account structural and HVAC related objectives. *Journal of Building Engineering*, 70, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106410>
- Bürdek, B. E. (1971). *Design: History, theory and practice of product design*. Bibliotheksverbund Bayern. <http://libcon.rec.uabc.mx:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbvb&AN=edsbvb.BV017978539&lang=es&site=eds-live>

- Canazei, M., Pohl, W., Bliem, H. R., Martini, M., y Weiss, E. M. (2017). Artificial skylight effects in a windowless office environment. *Building and Environment*, 124, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.045>
- Carrasco-Amador, J. P., Canito-Lobo, J. L., Castaño-Liberal, A., Rodríguez-Rego, J. M., y Matamoros-Pacheco, M. (2022). Actions to reduce carbon footprint in materials to healthcare buildings. *Heliyon*, 8(11), e11281. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11281>
- Castillo, M., y Castillo, C. (2014). *Aproximación bioclimática para el diseño de espacios públicos, análisis inicial en distintas plazas chilenas*. <http://scielo.sld.cu/pdf/au/v35n3/au06314.pdf>
- Castrejon-Campos, O. (2022). Evolution of clean energy technologies in Mexico: A multi-perspective analysis. *Energy for Sustainable Development*, 67, 29–53. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.01.003>
- Castro Bernal, G. (2017). *The Long View The Long View How will the global economic order change by 2050?* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27453.26089>
- Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción. (2012). *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética de Edificios Públicos* (1a ed.). Universidad de Chile. https://www.academia.edu/17347717/Manual_de_Diseño_Pasivo_y_Eficiencia_Energética_de_Edificios_Públicos
[http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif Publicos_Parte1.pdf](http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif-Publicos_Parte1.pdf)
- Chatellier Lorentzen, D. M. P., y McNeil, M. A. (2020). Electricity demand of non-residential buildings in Mexico. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102165. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102165>
- Chatterjee, S., y Ghosh, D. (2021). Impact of Global Warming on SENSEX fluctuations—A study based on Multifractal detrended cross correlation analysis between the temperature anomalies and the SENSEX fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 571, 125815. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125815>
- Chen, Q., Kuang, Z., Liu, X., y Zhang, T. (2022). Energy storage to solve the diurnal, weekly, and seasonal mismatch and achieve zero-carbon electricity consumption in buildings. *Applied Energy*, 312, 118744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118744>

- Chinazzo, G., Andersen, R. K., Azar, E., y Barthelmes, V. M. (2022). Quality criteria for multi-domain studies in the indoor environment: Critical review towards research guidelines and recommendations. *Building and Environment*, 226, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109719>
- Chong, A., Gu, Y., y Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, 253, 111533. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>
- Coakley, D., Raftery, P., y Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43612/1/S1800496_es.pdf
- Comisión Federal de Electricidad. (2024). *Pequeña Demanda Baja Tensión*. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/PequenaDemandaBT.aspx>
- Comisión Nacional para el Uso de Eficiencia de la Energía [CONUEE]. (2018). *Informe Nacional de Monitoreo de la Edificiencia Energética de México 2018*. Comisión Nacional para el Uso de Eficiencia de la Energía. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43612/1/S1800496_es.pdf
- Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI]. (2019). *LEED v4 for interior design and construction* (p. 95). US Green Building Council. https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED_v4_IDC_07.25.19_current.pdf
- Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI]. (2024). *Green Building 101*. <https://www.usgbc.org/articles/green-building-101-what-indoor-environmental-quality>
- Correal, G. D. (2007). El Proyecto De Arquitectura Como Forma De Producción De Conocimiento: Hacia La Investigación Proyectual. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 9, 48–58.
- Creswell, J. W., y Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (Third Edition). SAGE.
- Da Casa, M., Celis, F., y Echeverría, E. (2019). *METODOLOGÍA PARA ELABORAR UNA CARTOGRAFÍA REGIONAL Y APLICAR ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS*

- SEGÚN LA CARTA DE GIVONI*. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0719-07002019000200052&script=sci_arttext&lng=p
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2002). *NOM-015-STPS-2001*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=728016&fecha=14/06/2002
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2005). *Reglamento de Edificación para el Municipio de Mexicali*.
<http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/normatividad/reglamentos/pdf/edificaciones.pdf>
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2012). *NOM-024-ENER-2012*.
http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5273553
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2015). *NOM-025-STPS-2008*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404572&fecha=20/08/2015
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2016). *NOM-030-ENER-2016*.
http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6353/sener11_C/sener11_C.html
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2018). *NOM-035-STPS-2018*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2020). *ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética*. Secretaría de Gobernación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020
- Díaz, A. (2019). *Índices climáticos y bioclimáticos*. <https://biogeografia.net/bioclimate03.html>
- Díaz-Torres, Y., Valdivia-Noda, Y., Monteagudo-Yanes, J. P., y Miranda-Torres, Y. (2017). Application of building energy simulation in the validating of operational strategies of HVAC systems on a tropical hotel. *Ingeniería Mecánica*, 20(1), 31–38.
- Doherty, B., y Trenbath, K. (2019). Device-level plug load disaggregation in a zero energy office building and opportunities for energy savings. *Energy and Buildings*, 204, 109480. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109480>
- Dovjak, M., y Kuček, A. (2019). *Creating Healthy and Sustainable Buildings: An Assessment of Health Risk Factors*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3>
- Du, W., y Wang, G. (2020). Indoor Air Pollution was Nonnegligible during COVID-19 Lockdown. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(9), 1851–1855.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0281>

- Elaouzy, Y., y El Fadar, A. (2022). A multi-level evaluation of bioclimatic design in Mediterranean climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102124. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102124>
- García, A. (2014). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*. DesignBuilder. <https://www.designbuilder-lat.com/soporte/manual-de-ayuda>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen* (5a ed.). UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Ghaderian, M., y Veysi, F. (2021). Multi-objective optimization of energy efficiency and thermal comfort in an existing office building using NSGA-II with fitness approximation: A case study. *Journal of Building Engineering*, 41, 102440. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102440>
- Gobierno de Mexicali. (2022). *Plan Municipal de Desarrollo 2022-2024*.
- Gonzalo, G., y Nota, V. (2019). *Manual de Arquitectura Bioclimática*.
- Halser, E., Finhold, E., Leithäuser, N., Süß, P., y Küfer, K.-H. (2024). Pareto navigation for multicriteria building energy supply design. *Applied Energy*, 371, 123651. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123651>
- Hammad, A. W., Akbarnezhad, A., y Oldfield, P. (2018). Optimising embodied carbon and U-value in load bearing walls: A mathematical bi-objective mixed integer programming approach. *Energy and Buildings*, 174, 657–671. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.061>
- Hammond, G., y Jones, C. (2011). *Embodied Carbon—The Inventory of Carbon and Energy (ICE)* (2a ed.).
- Harshalatha, Patil, S., y Kini, P. G. (2024). A review on simulation based multi-objective optimization of space layout design parameters on building energy performance. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(1), 69. <https://doi.org/10.1007/s41024-024-00425-3>
- Hernández, F. F., López, J. M., Suárez, J. M., Muriano, M. C., y Rueda, S. C. (2017). Effects of louvers shading devices on visual comfort and energy demand of an office building. A case of study. *Energy Procedia*, 140, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.136>
- Hernández, J. J. (2018). *ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO ENFOCADO EN EL CONFORT TÉRMICO. CASO DE ESTUDIO DESARROLLADO A PARTIR DE*

SOLUCIONES PASIVAS PARA UNA EDIFICACIÓN DE OFICINAS EN CÚCUTA – NORTE DE SANTANDER. Universidad Católica de Colombia.

- Hernández, R., Fernandez, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación. Sexta edición* (6ta Edición). McGraw-hill / interamericana editores, s.a. De c.v.
https://drive.google.com/file/d/1mLhHKXSl_a_JZonoWOxs2FwHyQrhQ7L3m/view?usp=sharing_eil&ts=5d688290&usp=embed_facebook
- Hidalgo, V. R., Lozano Hernández, J. A., y Silva Cedillo, E. K. (2020). Medición de la habitabilidad en la vivienda de interés social. Caso de estudio: Municipio de Ecatepec y Tecámac. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 7(14), 59–65. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7i14.4474>
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., y Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168, 106508.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>
- Instituto de Obras Nuevas (New Buildings Institute) [NBI]. (2021). *Daylighting Pattern Guide*. <http://patternguide.advancedbuildings.net/about.html>
- Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (2016). *Índices del IMCO*.
<https://imco.org.mx/indices/el-estado-los-estados-y-la-gente/capitulos/el-estado-los-estados-y-la-gente/eficiencia-energetica>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2018). *Aspectos geográficos: Baja California*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2019). *Comercio. Cuéntame de México*.
<https://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/comercio/default.aspx?tema=e>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). *Mapas. Climatológicos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI.
<https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>
- Instituto Nacional Estadounidense de Estándares [ANSI]. (2021). *Introduction to ANSI*.
https://www.ansi.org/about_ansi/introduction/introduction?menuid=1
- Instituto Well del Bienestar [IWB]. (2019). *WELL Building Standard v2*. Well Building Institute. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Ishino, H., Murakami, S., Kohri, K., Makimura, I., y Nohara, F. (2019). Performance Evaluation of Energy- Efficient Hybrid Ventilation Systems for Office Buildings. *ASHRAE Transactions*, 125(Part 1), 563–570.

- Jiang, B. (2019). Living Structure Down to Earth and Up to Heaven: Christopher Alexander. *Urban Science*, 3(3). <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-35702>
- Johnson, K. C. (2010). A decarbonization strategy for the electricity sector: New-source subsidies. *Energy Policy*, 38(5), 2499–2507. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.044>
- Jung, C. C., Hsu, N. Y., y Su, H. J. (2019). Temporal and spatial variations in IAQ and its association with building characteristics and human activities in tropical and subtropical areas. *Building and Environment*, 163(July), 106249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106249>
- Kairies-Alvarado, D., Muñoz-Sanguinetti, C., y Martínez-Rocamora, A. (2021). Contribution of energy efficiency standards to life-cycle carbon footprint reduction in public buildings in Chile. *Energy and Buildings*, 236, 110797. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110797>
- Karimi, H., Adibhesami, M. A., Bazazzadeh, H., y Movafagh, S. (2023). Green Buildings: Human-Centered and Energy Efficiency Optimization Strategies. *Energies*, 16(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/en16093681>
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., y Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., y Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kubba, S. (Ed.). (2017). Handbook of Green Building Design and Construction (Second Edition). En *Handbook of Green Building Design and Construction (Second Edition)* (Second Edition, p. iv). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810433-0.12001-5>
- Lakhdari, K., Sriti, L., y Painter, B. (2021). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>
- Larsen, T. S., Rohde, L., Jonsson, K. T., Rasmussen, B., Jensen, R. L., Knudsen, H. N., Witterseh, T., y Bekö, G. (2020). IEQ-Compass – A tool for holistic evaluation of

- potential indoor environmental quality. *Building and Environment*, 172, 106707.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106707>
- Ledo Gomis, L., Fiorentini, M., y Daly, D. (2021). Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 231, 110597.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110597>
- Liu, B., y Pouramini, S. (2021). Multi-objective optimization for thermal comfort enhancement and greenhouse gas emission reduction in residential buildings applying retrofitting measures by an Enhanced Water Strider Optimization Algorithm: A case study. *Energy Reports*, 7, 1915–1929.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.03.044>
- Lomas, K. J., y Eppel, H. (1992). Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings*, 19(1), 21–44.
[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90033-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90033-D)
- Loukaidou, K., Michopoulos, A., y Zachariadis, Th. (2017). Nearly-zero Energy Buildings: Cost-optimal Analysis of Building Envelope Characteristics. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.069>
- Lumpkin, D. R., Horton, W. T., y Sinfield, J. V. (2020). Holistic synergy analysis for building subsystem performance and innovation opportunities. *Building and Environment*, 178, 106908. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106908>
- Luna-León, A. (2020). *Hoja de cálculo para cargas internas*.
- M. ElBatan, R., y Ismaeel, W. S. E. (2021). Applying a parametric design approach for optimizing daylighting and visual comfort in office buildings. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 3275–3284. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.014>
- Mancini, F., Nardecchia, F., Groppi, D., Ruperto, F., y Romeo, C. (2020). Indoor Environmental Quality Analysis for Optimizing Energy Consumptions Varying Air Ventilation Rates. *Sustainability*, 12(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/su12020482>
- Martínez, G. (Ed.). (2018). *Enfoques, Teorías y Perspectivas de la Arquitectura y sus Programas Académico* (21a ed.). CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DEL CARIBE CECAR. <https://doi.org/10.21892/9789588557724>
- Martínez-Comesaña, M., Eguía-Oller, P., Martínez-Torres, J., Febrero-Garrido, L., y Granada-Álvarez, E. (2022). Optimisation of thermal comfort and indoor air quality estimations applied to in-use buildings combining NSGA-III and XGBoost.

- Sustainable Cities and Society*, 80, 103723.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103723>
- Masson-Delmotte, V., y Zhai, P. (2019). *Resumen para responsables de políticas*
Resumen técnico Preguntas frecuentes Glosario. 110.
- Matic, D., Calzada, J. R., Todorovic, M. S., Erić, M., y Babin, M. (2017). Chapter 16—
 Cost-Effective Energy Refurbishment of Prefabricated Buildings in Serbia. En F.
 Pacheco-Torgal, C.-G. Granqvist, B. P. Jelle, G. P. Vanoli, N. Bianco, y J. Kurnitski
 (Eds.), *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* (pp. 455–487).
 Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00016-2>
- McArthur, J. j., y Powell, C. (2020). Health and wellness in commercial buildings:
 Systematic review of sustainable building rating systems and alignment with
 contemporary research. *Building and Environment*, 171.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106635>
- Muñoz, A. G. (2015). *Validación y calibración de la simulación energética de edificios*.
- Narici, M., Vito, G. D., Franchi, M., Paoli, A., Moro, T., Marcolin, G., Grassi, B.,
 Baldassarre, G., Zuccarelli, L., Biolo, G., di Girolamo, F. G., Fiotti, N., Dela, F.,
 Greenhaff, P., y Maganaris, C. (2021). Impact of sedentarism due to the COVID-19
 home confinement on neuromuscular, cardiovascular and metabolic health:
 Physiological and pathophysiological implications and recommendations for
 physical and nutritional countermeasures. *European Journal of Sport Science*,
 21(4), 614–635. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1761076>
- Nateghi, S., y Kaczmarczyk, J. (2023). Multi-objective optimization of window opening and
 thermostat control for enhanced indoor environment quality and energy efficiency
 in contrasting climates. *Journal of Building Engineering*, 78, 107617.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107617>
- Nibedita, B., y Irfan, M. (2021). The role of energy efficiency and energy diversity in
 reducing carbon emissions: Empirical evidence on the long-run trade-off or synergy
 in emerging economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40),
 56938–56954. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14642-7>
- Nieto Fernández, F. (2013). EL SISTEMA COMO LUGAR. TRES ESTRATEGIAS DE
 COLECTIVIZACIÓN DEL ESPACIO DOMÉSTICO CONTEMPORÁNEO. *Proyecto*,
Progreso, Arquitectura, 9, 50–67. <https://doi.org/10.12795/ppa.2013.i9.03>
- Obitko, M. (1998). *Introduction to Genetic Algorithms* [Czech Technical University].
<https://obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/introduction.php>

- Onchi, A. (2021). *Algoritmos y arquitectura: Una aportación al diseño*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Ordoñez García, A. (2017). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*.
- Ozarisoy, B., y Altan, H. (2021). Systematic literature review of bioclimatic design elements: Theories, methodologies and cases in the South-eastern Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 250, 111281.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111281>
- Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R., y Yuan, X. (2023). Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies. *Advances in Applied Energy*, 10, 100135.
<https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>
- Parker, D. S. (2009). Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data. *Energy and Buildings*, 41(5), 512–520.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.017>
- Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible—Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Resende, C., Artur, H., y Pinto, A. (2020). Analysis of the influence of soil in the thermal performance of subterranean rooms in a ground-level building in São Paulo, Brazil, via EnergyPlus. *Análisis de la influencia del suelo en el desempeño térmico de las habitaciones subterráneas en una edificación de una planta unifamiliar de São Paulo, Brasil, vía EnergyPlus.*, 28(1), 164–177.
- Rieder, W. G. (2003). Simulation and Modeling. En R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (pp. 815–835). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00692-X>
- Salingaros, N. (2018). *FORMA, LENGUAJE Y COMPLEJIDAD “UNA TEORIA UNIFICADA DE LA ARQUITECTURA” SALINGAROS , NIKOS*.
<http://www.publiarq.com/libros/forma-lenguaje-y-complejidad-una-teoria-unificada-de-la-arquitectura/978-84-947915-2-9>
- Salingaros, N. A. (2020). It’s Time for World Architecture to Learn from Christopher Alexander: Discovering Humanity’s Relationship with the Universe. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, 6(3), 376–380.
<https://doi.org/10.1016/j.sheji.2020.08.002>

- Sánchez-López, P. L. (2022). Comparativa de análisis climático para estrategias de diseño mediante simuladores y carta psicrométrica de Givoni. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial2), Article Especial2. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial2.8692>
- Santos-Herrero, J. M., Lopez-Guede, J. M., y Flores-Abascal, I. (2021). Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>
- Scofield, J. H. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Not really.... *Energy and Buildings*, 41(12), 1386–1390. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.006>
- Secretaría de Economía. (2016). *Información económica y estatal: Baja California*.
- Secretaría de Energía [SENER]. (2020). *Programa Sectorial de Energía 2020-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/562631/PS_SENER_CACEC-DOF_08-07-2020.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2007). *Instituto Nacional de Ecología, informe de actividades 2007* (p. 44). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020). *Contribución Determinada a nivel Nacional: México*. Gobierno de México.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2021). *Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024*.
- Shaeri, J., Habibi, A., Yaghoubi, M., y Chokhachian, A. (2019). The Optimum Window-to-Wall Ratio in Office Buildings for Hot–Humid, Hot–Dry, and Cold Climates in Iran. *Environments*, 6(4), 45. <https://doi.org/10.3390/environments6040045>
- Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE]. (2017). *ASHRAE climatic design conditions 2009/2013/2017*. <http://ashrae-meteo.info/v2.0/>
- Souayfane, F., Lima, R. M., Dahrouj, H., y Knio, O. (2022). A weather-clustering and energy-thermal comfort optimization methodology for indoor cooling in subtropical desert climates. *Journal of Building Engineering*, 51, 104327. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104327>
- Stasi, R., Liuzzi, S., Paterno, S., Ruggiero, F., Stefanizzi, P., y Stragapede, A. (2020). Combining bioclimatic strategies with efficient HVAC plants to reach nearly-zero

- energy building goals in Mediterranean climate. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102479. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102479>
- Sulaiman, M. H., y Mustaffa, Z. (2023). Using the evolutionary mating algorithm for optimizing the user comfort and energy consumption in smart building. *Journal of Building Engineering*, 76, 107139. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107139>
- Szczurek, A., Maciejewska, M., Wyłomańska, A., Zimroz, R., Żak, G., y Dolega, A. (2016). Detection of occupancy profile based on carbon dioxide concentration pattern matching. *Measurement*, 93, 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.036>
- Tedeschi, A., y Andreani, S. (2014). *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Leenseur Publisher. <https://books.google.com.mx/books?id=VWPcoQEACAAJ>
- Tham, K. W. (2016). Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings*, 130, 637–650. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.08.071>
- Tian, Z., Zhang, X., Jin, X., Zhou, X., Si, B., y Shi, X. (2018). Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, 158, 1306–1316. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.022>
- Timilsina, G. R., Pang, J., y Xi, Y. (2021). Enhancing the quality of climate policy analysis in China: Linking bottom-up and top-down models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111551>
- Timmons, D., Konstantinidis, C., Shapiro, A. M., y Wilson, A. (2016). Decarbonizing residential building energy: A cost-effective approach. *Energy Policy*, 92, 382–392. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.030>
- Tudela, F. (1982, enero 29). *Bioclima y confort térmico*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/26450>
- Vaisi, S., y Kharvari, F. (2019). Evaluation of Daylight regulations in buildings using daylight factor analysis method by radiance. *Energy for Sustainable Development*, 49, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.002>
- Velázquez Fernández, A., y Rey Cordova, N. (2007). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION CIENTÍFICA*.
- Villazón Godoy, R. E., y Rodríguez Vargas, D. F. (2020). *Sistemas de habitabilidad. Principios técnicos del proyecto de arquitectura: Vol. Primera edición*. Ediciones

Uniandes; eBook Collection (EBSCOhost).

<http://libcon.rec.uabc.mx:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2508447&lang=es&site=eds-live>

- Widera, B. (2021). Comparative analysis of user comfort and thermal performance of six types of vernacular dwellings as the first step towards climate resilient, sustainable and bioclimatic architecture in western sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110736.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110736>
- Wu, Y.-H., Liu, C.-H., Hung, M.-L., Liu, T.-Y., y Masui, T. (2019). Sectoral energy efficiency improvements in Taiwan: Evaluations using a hybrid of top-down and bottom-up models. *Energy Policy*, 132, 1241–1255.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.043>
- Yang, X., Liu, S., Zou, Y., Ji, W., Zhang, Q., Ahmed, A., Han, X., Shen, Y., y Zhang, S. (2022). Energy-saving potential prediction models for large-scale building: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111992.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111992>
- Zanocco, C., Flora, J., Rajagopal, R., y Boudet, H. (2021). Exploring the effects of California's COVID-19 shelter-in-place order on household energy practices and intention to adopt smart home technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110578>
- Zhang, Z. (2024). Multi-objective optimization method for building energy-efficient design based on multi-agent-assisted NSGA-II. *Energy Informatics*, 7(1), 90.
<https://doi.org/10.1186/s42162-024-00394-4>
- Zohuri, B., y McDaniel, P. (2021). Chapter 13—Energy storage driving renewable energy. En B. Zohuri y P. McDaniel (Eds.), *Introduction to Energy Essentials* (pp. 447–508). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90152-9.00013-X>
- Zou, Y., Lou, S., Xia, D., Lun, I. Y. F., y Yin, J. (2021). Multi-objective building design optimization considering the effects of long-term climate change. *Journal of Building Engineering*, 44, 102904. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102904>

Anexos