



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

**“Metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles para
comunidades rurales de México”**

TESIS

Para obtener el grado académico de:

Maestría en ingeniería ambiental y tecnologías sustentables

Presenta:

I.I.S. RAÚL OBED GONZÁLEZ AMARO

Director de Tesis:

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

Codirectora de Tesis:

DRA. PAMELA ESTRELLITA ZÚÑIGA BELLO

COMITÉ TUTORAL

Dr. Moisés Montiel González

Dra. Pamela Estrellita Zúñiga Bello

Dra. María Magdalena Morales Guillén

Dra. Areli Rizo Aguilar

Dra. Gabriela Hernández Luna

CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO.

MAYO 2026.

Título: “Metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles para comunidades rurales de México”.

Aspirante: I.I.S. RAÚL OBED GONZÁLEZ AMARO

Director de Tesis

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Codirectora de Tesis

DRA. PAMELA ESTRELLITA ZÚÑIGA BELLO

Escuela de Turismo. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Asesores

DRA. MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN

INEEL, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

DRA. ARELI RIZO AGUILAR

Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA

CIICAp, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias aplicadas

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias químicas e ingeniería (FCQeI) por el apoyo proporcionado como impulso a mi crecimiento personal y profesional.

Al Dr. Dr. Moisés Montiel González por su invaluable guía, paciencia, compromiso y también por ser una fuente constante de motivación y aprendizaje.

A la Dra. Pamela Estrellita Zúñiga Bello, por compartir generosamente su conocimiento y experiencia y brindarme la orientación adecuada en el momento oportuno, lo cual aportó claridad y dirección al proyecto.

A la Dra. María Magdalena Morales Guillén, por su grata manera de enseñar, por su calidez humana y por haber dejado una huella profunda en mi proceso formativo, no solo como guía académica, sino como ejemplo de vocación y entrega.

A la Dra. Areli Rizo Aguilar por ofrecerme su apoyo y entendimiento en momentos cruciales de mi formación. por sus palabras adecuadas y por depositar su confianza en mí.

A la Dra. Gabriela Hernández Luna por su contribución, saber y aportes durante la ejecución de esta investigación.

A mis compañeros y amigos: Mario, Beatriz, Josselyne, Omar, Dante, Karen, Arturo, Irma y Erick, por su compañía, su guía clara y su apoyo apacible pero incólume que hizo más nuestro el trayecto. No les agradezco solamente por su presencia en el espacio universitario, sino por esos instantes personales, improvisados e insustituibles que le dieron significado y cálides a mi tránsito por este procesó. Compartir con ustedes esta fase de mi vida fue un privilegio, sin duda, una de las experiencias más ricas y memorables.

DEDICATORIAS

A Dios,
por su amor y sabiduría.
"Encomienda al Señor tu camino; confía en él, y él actuará."
(Salmo 37:5)

A mi familia,
por ser mi origen, mi refugio y mi mayor apoyo.

Mis padres, Raúl y Mari, por su cariño ilimitado, su valor de trabajo y por creer siempre en mí en cada uno de los pasos de esta carrera.

A mis tías, Rosa y Martha, por su cariño, apoyo y por estar siempre presentes cuando más lo necesitaba.

Y a mi prima María Abigail, por su afectuosa compañía, palabras de ánimo y apoyo.

Gracias por ser parte de este logro. Esta meta también es de ustedes.

"Nada es tan peligroso para el progreso de la mente humana que suponer que nuestras ideas científicas son finales, que no existen misterios en la naturaleza, que nuestros triunfos son completos, y que no existen nuevos mundos por conquistar".

(Sir Humphry Davy, 1794).

RESUMEN

El sector de la construcción se ha posicionado como uno de los mayores contribuyentes de emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la alta demanda de materias primas vírgenes, energía para confort térmico y recursos naturales en general. Frente a este panorama, la descarbonización de las edificaciones residenciales se convierte en una prioridad, promoviendo la transformación de viviendas actuales en casas pasivas, las cuales integran estrategias de eficiencia energética, arquitectura bioclimática, materiales reciclados, así como el uso y generación de energías renovables, con estas estrategias se pretende lograr una disminución importante en los impactos ambientales del sector de la construcción.

Por lo anterior, en el presente trabajo se propone una metodología de diseño y fabricación de viviendas modulares sostenibles en comunidades rurales de la República Mexicana, donde la mayoría de estas comunidades se caracterizan por la necesidad apremiante de viviendas dignas y se ubican en climas extremos. La metodología propuesta incluye el diseño, modelado y evaluación térmica de viviendas modulares sostenibles ubicadas en nueve climas predominantes del país: cálidos húmedos, cálidos subhúmedos, templados subhúmedos, templados subhúmedos, secos, semisecos, muy secos, semifríos y fríos. Se evaluaron cinco materiales de construcción: dos convencionales (concreto común y cemento Portland) y tres ecomateriales (paneles ecológicos, concreto reciclado y madera recuperada), utilizados y modelados en seis tipologías de vivienda social.

El diseño geométrico y modelado de las viviendas se realizó aplicando la metodología de Modelado de Información de la Construcción (BIM, por sus siglas en inglés) y sus herramientas tales como IFC Builder y CYPE Architecture, para el cálculo y análisis de cargas térmicas de refrigeración y calefacción se utilizó el programa CYPETHERM LOADS. Los resultados muestran que los ecomateriales propuestos reducen el consumo energético hasta un 50% en

comparación con los materiales de construcción tradicionales, mejorando significativamente la eficiencia energética. Además, se ha analizado el potencial de la metodología BIM y sus herramientas de modelado para cumplir con los requerimientos de estándares internacionales como EDGE y Passivhaus, resaltando que, con el uso y la adecuada integración de ecomateriales, estrategias de diseño bioclimático y la posible implementación de ecotecnologías se puede incrementar la eficiencia energética de las viviendas rurales y en consecuencia contribuir a la construcción sostenible.

ABSTRACT

The construction sector has become one of the largest contributors to greenhouse gas emissions due to the high demand for virgin raw materials, energy for thermal comfort, and natural resources in general. In this context, the decarbonization of residential buildings has become a priority, promoting the transformation of existing dwellings into passive houses that incorporate energy-efficiency strategies, bioclimatic architecture, recycled materials, and the use and generation of renewable energy. These strategies are intended to achieve a significant reduction in the environmental impacts of the construction sector. Accordingly, this study proposes a methodology for the design and manufacturing of sustainable modular housing for rural communities in the Mexican Republic, where most of these communities are characterized by an urgent need for adequate housing and are located in extreme climates. The proposed methodology is considered comprehensive because it includes the design, modeling, and thermal evaluation of sustainable modular dwellings located in five predominant climate zones in the country: warm-humid, warm-subhumid, temperate-subhumid, dry, and semi-cold. Five construction materials were evaluated: two conventional materials (ordinary concrete and Portland cement) and three eco-materials (ecological panels, recycled concrete, and reclaimed wood), which were used and modeled in six social housing typologies.

The geometric design and modeling of the dwellings were carried out using the Building Information Modeling (BIM) methodology and its associated tools, such as IFC Builder and CYPE Architecture. For the calculation and analysis of cooling and heating thermal loads, the software CYPETHERM LOADS was used. The results show that the proposed eco-materials reduce energy consumption by up to 50% compared with traditional construction materials, significantly improving energy efficiency. In addition, the potential of the BIM methodology and its modeling tools to meet the requirements of international standards such as EDGE and Passivhaus was analyzed. The findings highlight that, through the use and proper integration of eco-materials, bioclimatic design strategies, and the possible implementation of ecotechnologies, the energy efficiency of rural housing can be increased and, consequently, contribute to sustainable construction.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIAS.....	4
RESUMEN	5
ABSTRACT... ..	7
CAPÍTULO 1. PANORAMA GENERAL DE LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE... ..	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 ANTECEDENTES	16
1.3 MARCO TEÓRICO	18
1.3.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)... ..	19
1.3.2 ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE	20
1.3.3 TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES... ..	21
1.3.4 ENERGÍA NETA CERO.....	23
1.3.5 ESTÁNDAR PASSIVHAUS... ..	24
1.3.6 DEMANDA Y NECESIDAD DE VIVIENDAS EN MÉXICO... ..	25
1.3.7 CERTIFICACIONES DE SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA VIVIENDA EN MÉXICO... ..	26
1.3.8 CYPE, BINserver.center	27
1.4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA... ..	28



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



1.5 CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA...	30
1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	30
1.7 HIPÓTESIS	31
1.8 JUSTIFICACIÓN	31
1.9 OBJETIVOS...	32
1.9.1 OBJETIVO GENERAL	32
1.9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS...	32
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y METODOLOGÍA...	33
2.1 DISEÑO EFICIENTE Y SOSTENIBLE...	33
2.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS...	35
2.3 TECNOLOGÍA EFICIENTE	35
2.4 DISEÑO PASIVO DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA...	35
2.5 DATOS Y DISEÑO BIOCLIMÁTICO...	36
2.5.1 EVALUACIÓN TÉRMICA INICIAL...	36
2.5.2 AJUSTES Y DISEÑO BIOCLIMÁTICO...	37
2.5.3 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA EFICIENTE...	37
CAPÍTULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL	40
3.1 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	55



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



4.1 ANÁLISIS DE CARGAS TÉRMICAS EN LOS CASOS DE ESTUDIO...	55
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGAS TÉRMICAS POR CLIMA, VIVIENDA Y MATERIAL...	56
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	88
5.1 CONCLUSIONES GENERALES	88
5.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS DEL ANÁLISIS TÉRMICO MULTICLIMA...	88
5.3 VALIDACIÓN METODOLÓGICA (BIN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA)...	89
5.4 IMPLICACIONES PARA COMUNIDADES RURALES DE MÉXICO	89
5.5 APOORTE CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO	89
5.6 LIMITACIONES	90
ABREVIATURAS...	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS...	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Desafíos de una red energética inteligente. “Evolution to net-zero energy buildings Andreas Athienitis, William O’Brien, and Jose	38
Tabla 2 Tabla de materiales sostenibles para la construcción modular.....	42
Tabla 3. Reducción real de la carga máxima de refrigeración por material	78
Tabla 4. Reducción real de la carga máxima de calefacción por material	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primera vivienda modular prefabricada ideada por el carpintero británico John Manning en 1830. Fuente U.S Navy Quonset Hut.	18
Figura 2. Objetivos de Desarrollo sostenible ODS, tomado de: (ONU-hábitat, 2018).....	19
Figura 3. Economía Circular. Tomado d: (Penosil,2021).....	21
Figura 4. Tecnologías sostenibles aplicables en la construcción. Construcción propia a partir de: (Chavarro, et al., 2017).....	22
Figura 5. Energía neta cero, adaptado de: (Ipur, 2023).....	24
Figura 6. Modelado de vivienda modular Passivhaus. Inspirada en el trabajo de (Aravena 2012), realizada	25
Figura 7. Total de hogares con necesidad de rentar, comprar o construir vivienda, Construcción propia con datos recogidos del ENVI 2020.....	26
Figura 8. Departamento rehabilitado bajo estándar Passivhaus en Mexico, imagen de: Moritz Bernouilly y Maltercio Estudio tomada de: https://www.archdaily.mx/mx/758491/mexico-rehabilitacion-de-un-departamento-bajo-estandar-passivhaus	27
Figura 9. Flujo de trabajo,BIMserver.center.....	28
Figura 10. Diagrama de diseño de eficiencia energética.....	34
Figura 11. Confort termico, Fuente: (Revista Mundo HVAC&R, 2020).....	36
Figura 12. Diagrama de metodología NZEB.....	38
Figura 13. Edificación para análisis diseñada en CYPE Architecture. (bimserver.center, 2024).....	43
Figura 14. Diagrama estrategia experimental.....	45
Figura 15. Cabaña modular.	47
Figura 16. Mapa de los climas predominantes de Mexico INEGI.....	48
Figura 17. Vista frontal vivienda de la edificación económica de 30 m ² propuesta de remodelación estructural... ..	49

Figura 18. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación económica de 30 m ² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)	49
Figura 19. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Popular 42.5 realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)... ..	50
Figura 20. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Tradicional 62.5 m ² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)... ..	51
Figura 21. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Media 97.5 m ² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)... ..	52
Figura 22. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Residencial 146 m ² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)... ..	53
Figura 23. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Residencial Plus 225m ² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)... ..	54
Figura 24. Comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados en el clima cálido húmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS	56
Figura 25. Comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados para el clima cálido subhúmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS... ..	57
Figura 26. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior para el clima cálido subhúmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS.....	58
Figura 27. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en el clima frío.....	59

Figura 28. Muestra la comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semifrío.....	60
Figura 29. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior, mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semifrío.....	61
Figura 30. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS, para clima templado húmedo.....	62
Figura 31. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior, para clima templado húmedo.....	63
Figura 32. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS, para clima templado subhúmedo	64
Figura 33. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS, para clima templado subhúmedo	65
Figura 34. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima seco.....	66
Figura 35. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS en clima seco	67
Figura 36. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semiseco	68
Figura 37. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS en clima semiseco	69
Figura 38. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima muy seco	70
Figura 39. Cargas máximas de refrigeración de análisis integral de los nueve climas requeridos para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS.....	71

Figura 40. Cargas máximas de calefacción de análisis integral de los nueve climas requeridos para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS.....	72
Figura 41. Distribución de la carga máxima de refrigeración para distintas tipologías de vivienda bajo el uso de materiales convencionales	73
Figura 42. Distribución de la carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con cemento Portland	74
Figura 43. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con concreto reciclado	75
Figura 44. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con madera recuperada	76
Figura 45. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con Ecopanel	77
Figura 46. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con material base	79
Figura 47. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con cemento Portland	80
Figura 48. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con concreto reciclado	81
Figura 49. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con madera recuperada	82
Figura 50. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con Ecopanel	83
Figura 51. Comparación de costos estimados por metro cuadrado de envolvente para los cinco materiales analizados	86
Figura 52. Relación entre el costo estimado por metro cuadrado de envolvente y la carga térmica relativa de cinco materiales constructivos empleados en vivienda modular: madera recuperada, concreto reciclado, Ecopanel, cemento Portland y cemento convencional	87

CAPITULO 1: PANORAMA GENERAL DE LA CONSTRUCCION SOSTENIBLE.

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el problema de escasez de viviendas en México, así como de la calidad con que se edifican ha alcanzado proporciones críticas, según ONU-Hábitat (2018): El programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos estima que al menos el 38.4 % de la población mexicana vive en un espacio no adecuado; es decir, en condiciones de hacinamiento, sin materiales perdurables, o sin servicios básicos como el agua potable y drenaje, afectando especialmente a las comunidades más vulnerables. Este desafío se ha agravado en los últimos años debido al crecimiento de la población y la urbanización acelerada, por lo que la necesidad de proporcionar viviendas adecuadas y sostenibles a estas comunidades se ha convertido en una prioridad ineludible para el desarrollo y bienestar de sus habitantes. Es fundamental considerar que la vivienda no solo es una necesidad básica, sino también un espacio que influye en el bienestar de sus habitantes, en el medio ambiente y en la economía local (Luengo Arias, 2020).

El interés por diseñar y modelar viviendas sostenibles y económicamente asequibles ha aumentado significativamente en los últimos años, este enfoque ofrece una oportunidad única para abordar la escasez de viviendas de manera responsable reduciendo el impacto ambiental, mejorando la eficiencia energética y fomentando el uso de materiales reciclables. Una opción es producir viviendas modulares sostenibles, esto se puede lograr incorporando tecnologías y enfoques como “*Passivhaus*”, “*Edificación Neta Cero*” y otros similares al proceso de fabricación. La innovación en el campo mobiliario promoverá que las viviendas sean energéticamente eficientes, produzcan su propia energía renovable, además de mejorar las condiciones de vida de sus residentes (Rizzi, 2018).

Paralelamente, el informe Perspectivas de la Nueva Energía 2024 de BloombergNEF demuestra que, a pesar de la urgencia, aún es posible alcanzar el objetivo principal del Acuerdo de París: mantener el calentamiento global muy por debajo de los dos grados centígrados y evitar los peores efectos del cambio climático. Este informe destaca la necesidad de acelerar la implementación de tecnologías limpias y la reducción de la cantidad de carbono en el sector eléctrico. (Roca,2024).

1.2 ANTECEDENTES

La Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) (INEGI, 2020), señala que en el 21.1% de los hogares del país (7.6 millones) al menos un miembro de la familia necesita o está planeando rentar, comprar o construir una vivienda. Esto se traduce en la necesidad de 8.2 millones de viviendas adicionales en México, desafíos en términos de acceso a viviendas dignas y sostenibles; por lo cual la implementación de viviendas modulares sostenibles se ha planteado como una solución a corto y mediano plazo lo que podría mejorar la calidad de vida de sus habitantes y a su vez reducir los problemas ambientales. Falta de acceso a la vivienda digna ya que familias viven en condiciones precarias, con viviendas inadecuadas, altos costos de adquisición y el uso intensivo de recursos naturales: la construcción tradicional depende de materiales como el concreto cuya producción es intensiva en consumo de energía y emisiones de CO₂.

El término “*Economía circular*” comenzó a ganar relevancia en la literatura académica y discurso público a finales del año 1970, académicos y líderes comenzaron a explorar a mayor detalle las limitaciones del modelo económico lineal tradicional basado en “tomar, hacer, desechar”. El informe “*Límites del Crecimiento*” del Club de Roma en 1972 y los trabajos de investigadores como Walter R. Stahel (2020) y David W. Pearce (2017) sentaron las bases para repensar la relación entre la economía, el medio ambiente y los recursos.

Stahel (2020), en particular, acuñó el término “*Economía de rendimiento*” en 1976, que más tarde evolucionaría hacia el concepto que conocemos como “*Economía circular*”. Stahel (2020) promovió la idea de extender la vida útil de los productos, repararlos y reciclarlos para reducir la demanda de capital natural y ciclar los materiales.

La economía circular también se benefició de la creciente conciencia ambiental en las décadas de 1980 y 1990, así como de la necesidad de abordar los desafíos de la contaminación, la escasez de recursos y los problemas asociados con el agotamiento de materias primas (CEPAL, 2021).

En el informe “*Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*” publicado por la Fundación Ellen MacArthur en 2013, este destaca la necesidad de alejarse del modelo económico lineal tradicional de “*tomar, hacer, desechar*” hacia un sistema en el que los productos, recursos y productos se mantengan en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la generación de residuos y la explotación de recursos naturales (MacArthur, 2017).

“En los últimos años la economía circular ha cobrado importancia en América Latina y el Caribe (ALC) como un enfoque que favorece el desarrollo sostenible. Los países de la región, o bien han aplicado, o bien están planificando nuevas políticas, iniciativas públicas y hojas de ruta vinculadas a la economía circular” (UNEP, 2022).

“La pandemia de la COVID-19 ha puesto de manifiesto importantes deficiencias en la economía lineal: la vulnerabilidad de las cadenas de valor mundiales, el agotamiento de los recursos naturales y la exacerbación de las desigualdades sociales. La economía circular propone un marco alternativo para adoptar un modelo económico más resiliente e inclusivo en los países de ALC” (Schröder, et al., 2020).

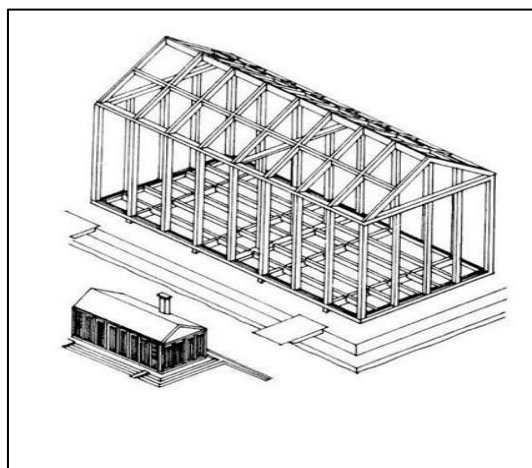


Figura 1. Primera vivienda modular prefabricada ideada por el carpintero británico John Manning en 1830. Fuente U.S Navy Quonset Hut.

1.3 MARCO TEÓRICO.

Este capítulo muestra que es una tecnología sostenible y economía circular, así mismo se abordan los fundamentos de la certificación energía neta cero y el estándar Passivhaus que nos sirven como base para comprender y analizar el fenómeno y aplicación de la tecnología verde en viviendas modulares en comunidades rurales en México y se menciona la necesidad de viviendas presentes en la república.

1.3.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).

El desarrollo sostenible se ha convertido en una prioridad global en el contexto actual de desafíos socioeconómicos y ambientales. El sector de la vivienda es uno de los temas clave para abordar esta agenda, especialmente en las comunidades rurales, en este proyecto se relaciona de manera directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, ONU-Hábitat, 2018), dichos objetivos son los siguientes (Figura 2):

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.**

Se contribuye con el proyecto al maximizar la eficiencia energética, reduciendo significativamente el consumo de energía mediante el aislamiento térmico, ventilación controlada y uso de fuentes renovables.

- **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.**

Se fomenta la innovación en materiales sostenibles y la industrialización eficiente de componentes, mejorando la infraestructura resiliente.

- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.**

Se ofrecen soluciones habitacionales asequibles y sostenibles que promueven comunidades bien planificadas.

- **ODS 12: Producción y consumo responsables.**

Al reducir residuos de construcción y utilizar materiales reciclables, fomentando un consumo y producción responsables.



Figura 2. Objetivos de Desarrollo sostenible ODS, tomado de: (ONU-hábitat, 2018)

1.3.2 ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE.

La economía circular es un enfoque económico y ambiental que se centra en la sostenibilidad y la eficiencia de los recursos. Su objetivo fundamental es preservar el valor de los materiales y productos durante el mayor tiempo posible, evitando regresar la mayor cantidad de desechos posible a la naturaleza. En lugar de seguir un modelo lineal de producción, consumo y eliminación, como en la economía tradicional, la economía circular busca crear un sistema en el que los productos, componentes y materiales se mantengan en uso y circulación durante el mayor tiempo posible (CEPAL, 2021).

En el contexto de la metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles para comunidades rurales de México, la economía circular juega un papel crucial. Este enfoque se refleja en varias características clave:

- Reducción de insumos y menor utilización de recursos naturales: Se promueve el uso de materiales locales y reciclables, disminuyendo la dependencia de recursos no renovables y reduciendo el impacto ambiental de la extracción y transporte de materiales.
- Compartir en mayor medida la energía y los recursos renovables y reciclables: Las viviendas modulares están diseñadas para integrar sistemas de energía renovable, como paneles solares, y tecnologías de reutilización de agua, contribuyendo a un uso más eficiente de los recursos.
- Reducción de emisiones: La implementación de estándares de energía neta cero y Passivhaus en el diseño y construcción de las viviendas reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Disminuir las pérdidas de materiales y de los residuos: El diseño modular permite un uso más eficiente de los materiales de construcción, minimizando los desechos generados durante el proceso de fabricación.

Mantener el valor de productos, componentes y materiales en la economía: Las viviendas modulares están diseñadas para ser duraderas y fácilmente reparables, extendiendo su vida útil y manteniendo el valor de los materiales en circulación (Cerdá & Khalilova, 2016) (Figura 3):

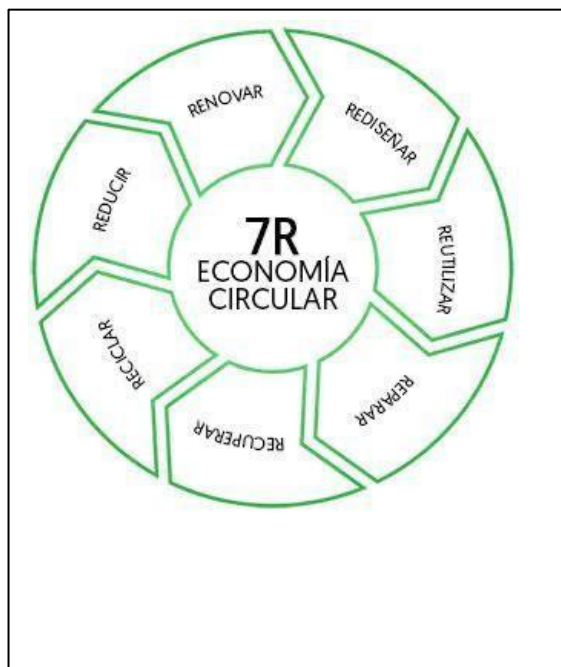


Figura 3. Economía Circular. Tomado de: (Penosil, 2021)

1.3.3 TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES.

La tecnología sostenible, también conocida como tecnología verde es el conjunto de conocimientos técnicos y científicos usados para diseñar, crear y utilizar productos, procesos y sistemas que minimizan el impacto negativo en el medio ambiente, y promueven la sostenibilidad a largo plazo. Tiene como objetivo principal satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones y los recursos naturales disponibles para cubrir sus propias necesidades (Chavarro, et al., 2017) (Figura 4).

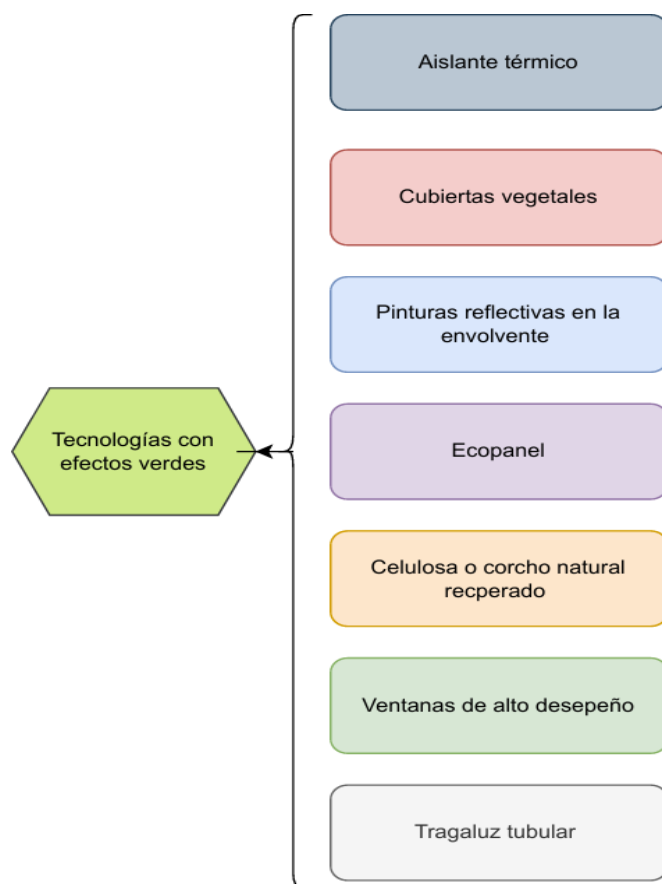


Figura 4. Tecnologías sostenibles aplicables en la construcción. Construcción propia a partir de: (Chavarro, et al., 2017)

1.3.4 ENERGÍA NETA CERO.

La "Energía Neta Cero" se refiere a una condición en la que un edificio o sistema, consume y produce energía de manera que, a lo largo de un período de tiempo determinado, la cantidad de energía que se suministra desde fuentes de energía es igual o menor que la cantidad de energía que se exporta desde fuentes de energía renovable en el lugar. En otras palabras, la energía neta consumida es cero o negativa, lo que significa que el edificio o sistema produce más energía de la que consume, y el exceso se aporta a la red o se almacena para su uso posterior (DOE, 2021).

Para lograr la condición de "Energía Neta Cero," se utilizan tecnologías y estrategias de eficiencia energética, así como fuentes de energía renovable, como la energía solar. Estos edificios eficientes pueden estar equipados con características como fachadas prefabricadas, sistemas de calefacción y refrigeraciones inteligentes, y techos aislados con paneles solares.

El resultado es un edificio que puede mantenerse cálido y confortable mientras minimiza o incluso elimina su dependencia de fuentes de energía no renovables y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Garzón, 2023).

La meta de la "Energía Neta Cero" es contribuir a la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono de los edificios y sistemas, al mismo tiempo que promueve la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía renovable. Este enfoque es una parte importante de los esfuerzos para abordar el calentamiento global y la transición hacia una sociedad más sostenible desde el punto de vista energético (Ipur, 2023) (Figura 5).



Figura 5. Energía neta cero, adaptado de: (Ipur, 2023)

1.3.5 ESTÁNDAR PASSIVHAUS.

Passivhaus es un estándar utilizado para el diseño y edificación en viviendas sostenibles y -es extremadamente eficiente desde el punto de vista energético, se enfoca en disminuir significativamente la cantidad de energía usada para calentar y enfriar los edificios. Dichos edificios Pasivos están concebidos para mantener un clima interior confortable durante todo el año con un mínimo consumo de energía, utilizando características como máximo aislamiento, ventilación controlada, ventanas de triple acristalamiento e intercambiadores de calor (Corner, et al., 2017).



Figura 6. Modelado de vivienda modular Passivhaus. Inspirada en el trabajo de (Aravena 2012), realizada.

1.3.6 DEMANDA Y NECESIDAD DE VIVIENDAS EN MÉXICO.

La demanda de vivienda es un tema de gran interés debido a su importancia económica y social; el 21.1% o 7.6 millones de hogares indicó que al menos uno de sus miembros tiene la necesidad o la intención de rentar, comprar o construir una vivienda. En total, se identificaron 8.2 millones de viviendas requeridas, lo que representa un 23.3% del total de viviendas particulares habitadas en México. Dentro de las viviendas requeridas, se distinguen tres categorías principales (INEGI, 2020):

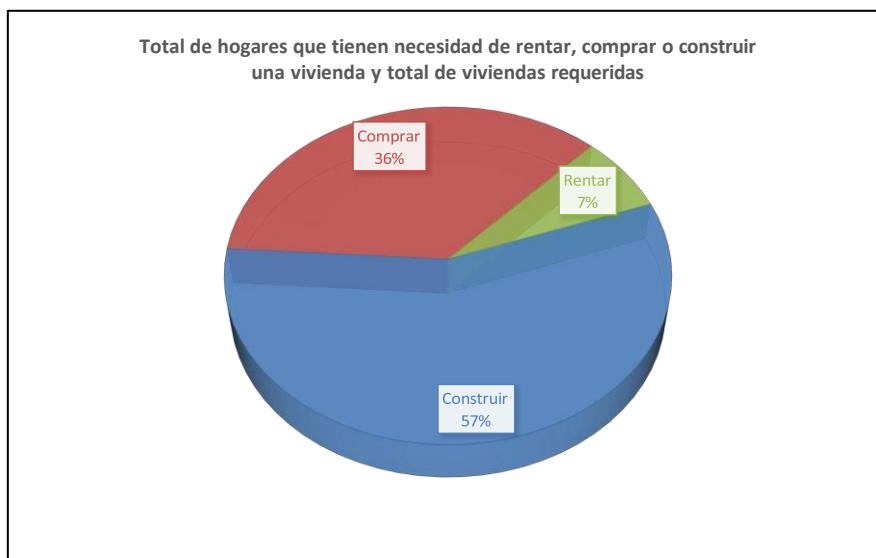


Figura 7. Total de hogares con necesidad de rentar, comprar o construir vivienda, Construcción propia con datos recogidos del ENVI 2020.

1.3.7 CERTIFICACIONES DE SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA VIVIENDA EN MÉXICO

En México, existen diversas certificaciones que promueven la sostenibilidad en edificaciones, muchas de las cuales integran criterios de eficiencia energética y energía neta cero. Entre las más reconocidas a nivel internacional se encuentra la Certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que evalúa aspectos como eficiencia energética, uso de materiales sostenibles y calidad ambiental interior, además de la certificación PASSIVHAUSE. Dentro de este marco, ya existen ejemplos notables de edificaciones que buscan acercarse al modelo de energía neta cero, como la Torre Reforma (CDMX), certificada LEED Platino, o el Edificio Corporativo Bioparque, que integra sistemas pasivos y activos para minimizar el consumo energético. Estas iniciativas demuestran que la certificación no solo eleva los estándares de calidad ambiental, sino que también abre camino hacia un desarrollo más resiliente y sostenible.



Figura 8. Departamento rehabilitado bajo estándar Passivhaus en Mexico, imagen de: Moritz Bernouilly y Maltercio Estudio tomada de: <https://www.archdaily.mx/mx/758491/mexico-rehabilitacion-de-un-departamento-bajo-estandar-passivhaus>

1.3.8 CYPE, BIMserver.center.

La plataforma en la nube creada por CYPE, BIMserver.center, sirve como Entorno de Datos Comunes (CDE) para administrar, compartir y actualizar los proyectos de arquitectura, ingeniería y construcción (AEC). Este CDE facilita la comunicación directa entre todos los usuarios y las aplicaciones involucradas en un proyecto, integrando un flujo de trabajo Open BIM mundialmente reconocido.

BIMserver.center ofrece una amplia librería de aplicaciones que facilitan distintas fases y aspectos del ciclo de vida de un proyecto AEC. Estas aplicaciones abarcan desde el diseño y la ingeniería hasta la construcción y la gestión de instalaciones, proporcionando herramientas especializadas para cada etapa del proceso.

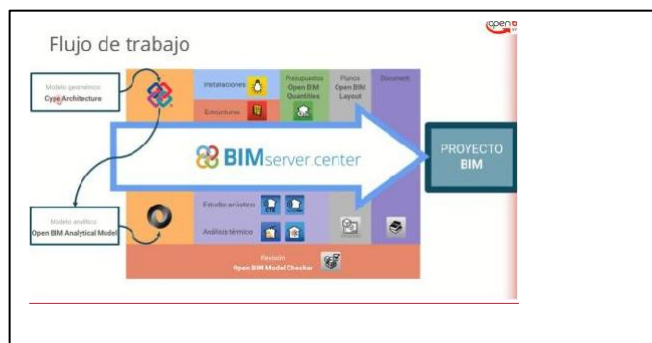


Figura 9. Flujo de trabajo de BIMserver.center.

A continuación, se describen algunas de las aplicaciones utilizadas para el proyecto:

CYPE Architecture es una herramienta de modelado BIM desarrollada por CYPE que permite a los profesionales del sector AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) trabajar en un entorno colaborativo y coordinado. Esta aplicación está diseñada para mejorar la colaboración y la coordinación entre los diferentes agentes implicados en un proyecto, facilitando la integración y la comunicación en todas las fases de este.

CYPETHERM LOADS es una aplicación especializada de CYPE para el cálculo de cargas térmicas en edificios, diseñada para ingenieros y profesionales de la climatización y la energía. Esta herramienta utiliza datos climáticos detallados y metodologías avanzadas para asegurar que los sistemas de climatización sean eficientes y adecuados para las condiciones específicas del proyecto.

1.4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En las últimas décadas el crecimiento poblacional y la urbanización han aumentado la demanda global de viviendas, las comunidades rurales enfrentan desafíos significativos en cuanto al acceso a hogares dignos y sostenibles. Para abordar esta problemática y al mismo tiempo reducir los problemas

ambientales, se ha propuesto la implementación de viviendas modulares con un enfoque en la economía circular y de desarrollo sostenible, lo que ha ganado relevancia en el contexto mundial. La metodología para la realización de dichas viviendas con energía neta cero es de gran relevancia en la actualidad, ya que busca abordar la esta problemática a través de una solución concreta (Torres-Parra, et al., 2023) (Shahi, 2012).

Las viviendas modulares sostenibles o también conocidas como Unidades Modulares Ecológicas (UME) son elementos prefabricados diseñados para la construcción de viviendas y edificaciones, caracterizados por su enfoque sostenible y eficiente. Estas unidades están elaboradas con materiales ecológicos, reciclados o de bajo impacto ambiental, se producen mediante procesos optimizados que reducen el desperdicio y el consumo de recursos. Dentro de sus características principales son la sostenibilidad ya se utilizan materiales locales o reciclados, minimizando la huella ambiental durante su fabricación y transporte.

Las piezas modulares al ser fabricadas en bloques estándar se pueden ensamblar fácilmente en sitio, acelerando el proceso constructivo y eficiencia energética: debido a la incorporación de tecnologías bajo el estándar Passivhaus que favorece el aislamiento térmico y la eficiencia energética de las edificaciones (Apaza, et al 2023).

Algunas de las características que se observan al emplear viviendas modulares sostenibles son las siguientes:

- Energía Neta Cero (ENC) implica que una vivienda genera la misma cantidad de energía que consume, lo que la hace altamente eficiente desde el punto de vista energético. Se logra a través de la incorporación de fuentes de energía renovable, como sistemas fototérmicos y energía solar fotovoltaica (Chacón, 2022) (Giudicianni, et al., 2020).

- Confort térmico es esencial en cualquier vivienda, incluyendo las sostenibles, el diseño de viviendas modulares sostenibles debe considerar estrategias para mantener temperaturas agradables en el interior, utilizando aislamiento de alta calidad, ventilación eficiente y sistemas de calefacción/ intercambiadores de calor sostenibles (Giraldo-Castañeda, et al., 2021) (Rodríguez Huitrado, 2021).

1.5 CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

La combinación de tecnología y diseño juega un papel fundamental en la creación de viviendas modulares sostenibles, y a pesar de la relativa novedad de la utilización de contenedores, se destaca la diversidad y calidad en los diseños, lo que sugiere un potencial para adaptarse a diferentes necesidades y contextos. Los diseños son de alta calidad tanto en concepción como en apariencia, presentan amplia capacidad de ensamblaje como piezas de lego y una gran adaptación a las tecnologías sostenibles (Basterra & Hermana, 2020) (Labastid, et al., 2018) (Nam, et al., 2020).

1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

De acuerdo con el informe del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2018) sobre el Derecho a la Vivienda en México, aproximadamente 14 millones de hogares, (- 45%), no tienen acceso a una vivienda digna y decorosa debido a la falta de recursos económicos. Esto implica que solo 17.5 millones de hogares se encuentran en condiciones favorables para el desarrollo humano, social y económico de sus habitantes. Los datos indican que los estados más pobres, como Chiapas, Guerrero y Oaxaca, presentan un déficit habitacional crítico, ya más del 70% de su población requiere mejoras sustanciales en su vivienda completamente nuevas.

En el contexto anterior y con la finalidad de contribuir a la construcción sostenible, las viviendas modulares se presentan como una opción prometedora debido a su capacidad de adaptación, versatilidad, menor tiempo de construcción y reducción de costos de inversión en comparación con las viviendas tradicionales. Sin embargo, aún es necesario desarrollar una metodología que incorpore los principios y estrategias de la economía circular desde su diseño con energía nZEB y así lograr la certificación Passivhaus.

1.7 HIPÓTESIS

La implementación de una metodología eficiente de economía circular en el diseño y construcción de viviendas promoverá el desarrollo sostenible de comunidades locales y tendrá como finalidad generar conocimientos y soluciones prácticas que sean aplicables y útiles para abordar los desafíos ambientales y sociales en el sector de la construcción. El modelo generado contribuirá a la mejora de la calidad de vida de las comunidades, desarrollo socioeconómico y creación de un entorno construido más sostenible.

1.8 JUSTIFICACIÓN.

El acceso a viviendas dignas y tecnológicamente sostenibles es un componente esencial para el desarrollo humano, social, ambiental y económico de la población. La falta de viviendas adecuadas no solo afecta la calidad de vida de las personas, sino que también tiene un impacto significativo en su bienestar general y en el desarrollo sostenible de las comunidades rurales en particular. La construcción de viviendas modulares sostenibles es una respuesta apropiada para mejorar las condiciones de vida de las poblaciones rurales y promover un desarrollo más equitativo y sostenible en el país, por lo cual el presente trabajo busca cubrir dichas necesidades con el diseño de viviendas modulares con tecnología neta cero para disminuir el impacto ambiental que las viviendas tradicionales poseen.

1.9 OBJETIVOS.

1.9.1 OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar una metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles con base en variables y parámetros de escalamiento, mediante la aplicación de principios y estrategias de la economía circular en el sector de la construcción para mejorar el hábitat de comunidades rurales de la República Mexicana.

1.9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Investigar las ecotecnologías y materiales existentes a nivel local e internacional -con la finalidad de seleccionar variables y parámetros de escalamiento, así como aplicar las mejores prácticas de construcción sostenible.
- Proponer una vivienda modular sostenible a escala con variables y parámetros de una comunidad rural seleccionada, con el fin de evaluar su viabilidad práctica, sostenibilidad económica y el impacto positivo en el hábitat de la comunidad.
- Aplicar los principios de la economía circular en el proceso de fabricación de viviendas modulares sostenibles e implementar el procedimiento para las condiciones climatológicas de comunidades rurales en México.
- Evaluar la sostenibilidad de las viviendas modulares para dimensionar el impacto en términos de sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y mejora de la calidad de vida de los residentes.

CAPITULO 2. DISEÑO Y METODOLOGÍA.

A continuación, se presenta la metodología donde se analizan diversos diseños de viviendas modulares que incorporarán principios de sostenibilidad y eficiencia energética. En este contexto, se considera la adaptación de distintos materiales de construcción como una opción viable, teniendo en cuenta la economía circular. Posteriormente se llevará a cabo el modelado de información de la construcción (BIM) la cual es la metodología que incluye la información y los procesos involucrados en el ciclo de vida de un proyecto de la edificación.

En el enfoque BIM, la etapa inicial consiste en desarrollar un modelo digital de la vivienda, el cual integra elementos tridimensionales con información asociada de diversa naturaleza. Este entorno virtual permite incorporar datos técnicos, energéticos y constructivos que facilitan el análisis del desempeño del proyecto. A partir de esta información, es posible evaluar la eficiencia de la vivienda y verificar su cumplimiento con criterios establecidos en certificaciones energéticas o de sostenibilidad.

2.1 DISEÑO EFICIENTE Y SOSTENIBLE.

El proceso se centrará en el diseño eficiente y sostenible de las viviendas modulares, esta fase se basa en la revisión de casos de estudio relevantes y la visión teórica de expertos en sostenibilidad, se destaca la importancia de un diseño adecuado, incluyendo elementos como la orientación solar y la ventilación natural. La finalidad principal es asegurar que las viviendas sean energéticamente eficientes desde su concepción desarrollando una metodología de fabricación de edificaciones modulares sostenibles.

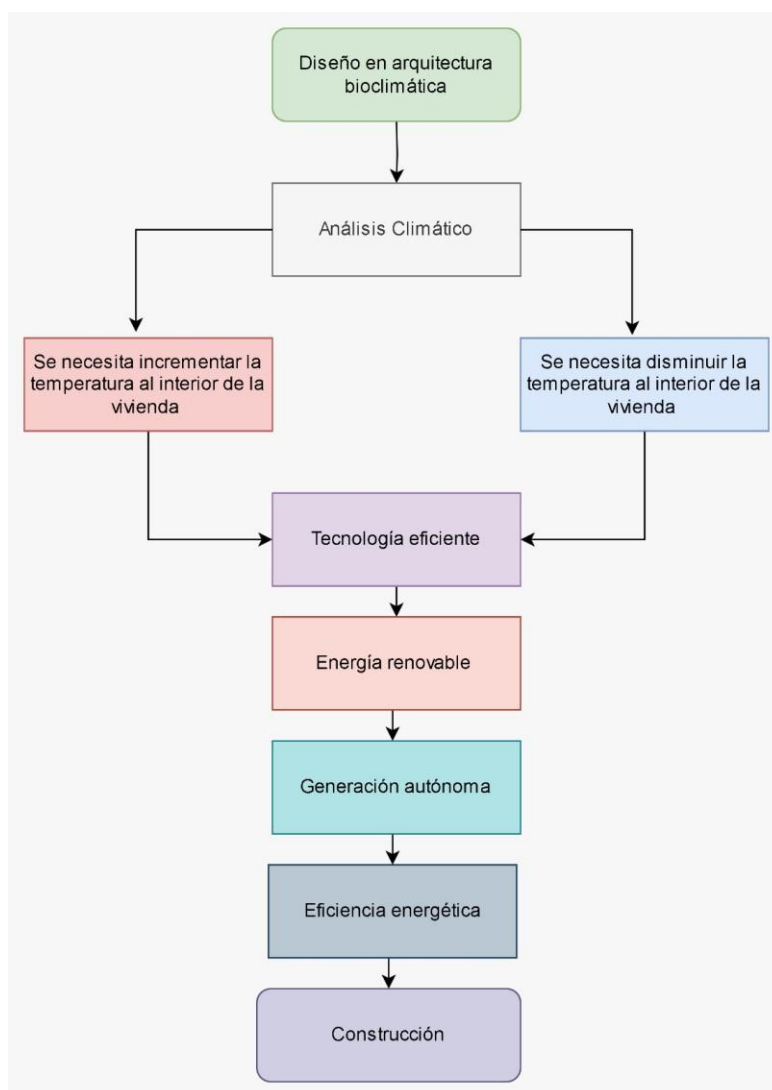


Figura 10. Diagrama de diseño de eficiencia energética.

2.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS.

Se diseñarán los requerimientos técnicos específicos del sistema constructivo de las viviendas modulares, esto incluye aspectos como la transmitancia térmica, la resistencia térmica, las orientaciones de las viviendas y la ventilación natural. Estos requisitos se establecerán como parte integral del objeto arquitectónico para garantizar la eficiencia energética.

2.3 TECNOLOGÍA EFICIENTE.

La metodología incorporará la utilización de tecnología eficiente como parte fundamental del proceso, esta tecnología se elige cuidadosamente para potenciar el diseño eficiente de las viviendas modulares.

La sinergia entre diseño y la implementación de tecnologías sostenibles es crucial, ya que en la fase creativa se busca minimizar el uso de sistemas mecánicos convencionales, mientras que la tecnología sostenible reduce la demanda básica de energía

2.4 DISEÑO PASIVO DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA.

Finalmente, se considera la optimización del desempeño térmico mediante el uso de materiales pasivos en la envolvente de la vivienda. Este enfoque se basa en la selección y configuración de sistemas constructivos que respondan a las condiciones climáticas específicas y a las necesidades de confort de los usuarios. La envolvente térmica se integra como un elemento clave en la concepción global de las viviendas modulares sostenibles, permitiendo reducir las ganancias y pérdidas de calor a través de muros, techos y elementos de cerramiento.

Desarrollando viviendas que, mediante estrategias pasivas como el aislamiento térmico, la inercia térmica y el uso de materiales ecológicos, minimicen la demanda energética para climatización, mejorando el confort interior sin depender exclusivamente de sistemas activos de generación de energía.

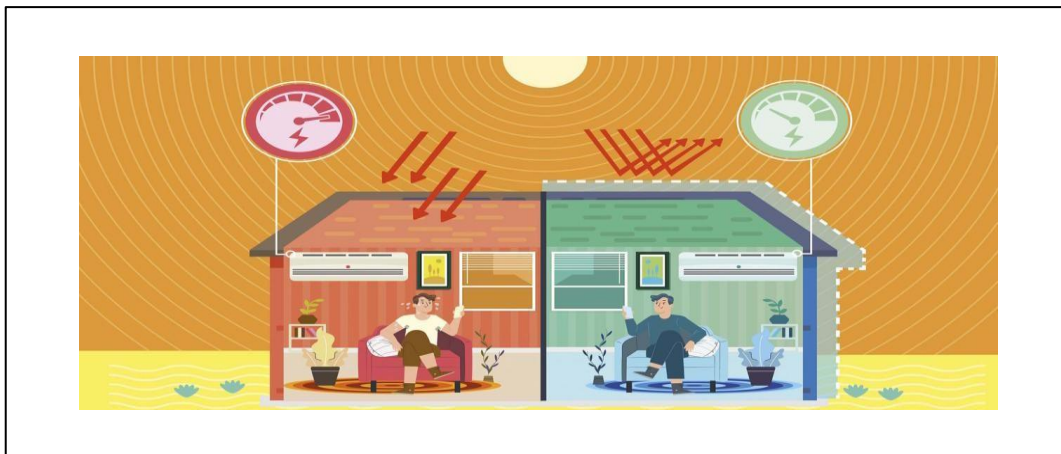


Figura 11. Confort térmico, Fuente: (Revista Mundo HVAC&R, 2020).

2.5 DATOS Y DISEÑO BIOCLIMÁTICO.

2.5.1 EVALUACIÓN TÉRMICA INICIAL.

La metodología comienza con una evaluación térmica inicial del anteproyecto de viviendas modulares sostenibles, se busca determinar las ganancias de calor a través de la envolvente del edificio con el objetivo de optimizar el diseño constructivo y garantizar el confort térmico de los futuros habitantes. El confort térmico intervalo se establece entre 22° y 28°C (ASHRAE, 2023).

2.5.2 AJUSTES Y DISEÑO BIOCLIMÁTICO.

En función de los resultados de la evaluación térmica, se realizarán ajustes en el diseño de las viviendas modulares. Estos ajustes pueden incluir modificaciones en las dimensiones, el uso de materiales de construcción, la incorporación de elementos de sombreado, y la optimización de la envolvente para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico.

2.5.3 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA EFICIENTE.

Con base en el análisis de eficiencia, se definen los requerimientos energéticos específicos para las viviendas modulares sostenibles en las comunidades rurales de México.

Se evalúa las envolventes disponibles por región y las soluciones eficientes que pueden ser aplicadas en las viviendas modulares. Esto abarca desde material de reciclaje, sistemas de iluminación eficientes, sistemas de climatización eficientes (Figura 12).

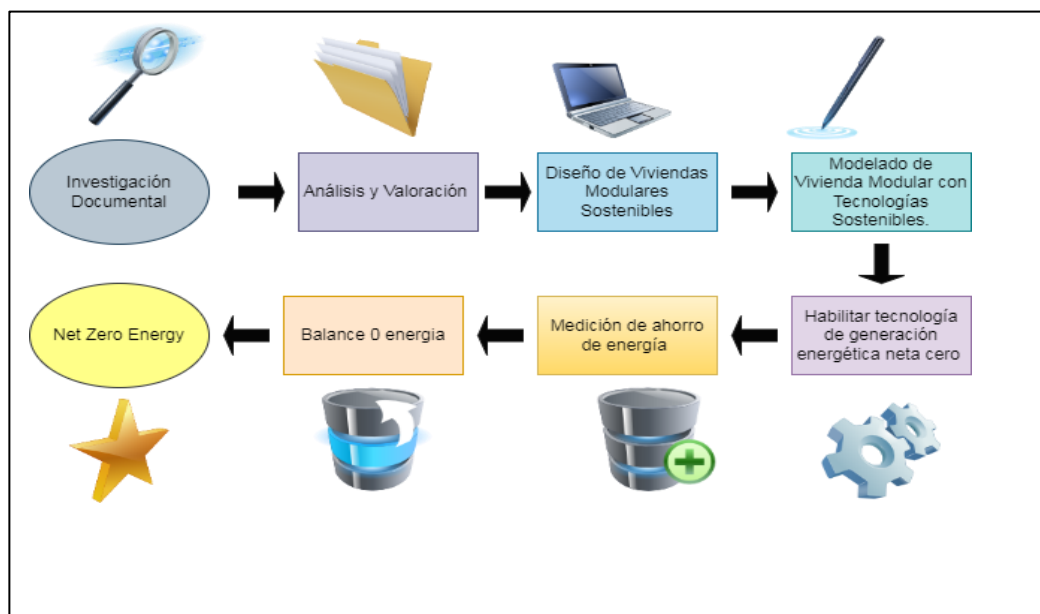


Figura 12. Diagrama de metodología NZEB.

Tabla 1. Desafíos de una red energética inteligente. “Evolution to net-zero energy buildings Andreas Athienitis, William O’Brien, and Jose

Tecnología convencional	Tipo de ahorro	Tecnología eficiente
Bombillas convencionales	Eléctrico	Lámparas led de bajo consumo
Energía eléctrica suministrada por el estado	Eléctrico	Turbina eólica
Energía eléctrica suministrada por el estado	Eléctrico	Panel Fotovoltaico
Bombillas convencionales	Eléctrico	Tragaluces tubulares
Ventilador, aire acondicionado, calentador, etc.	Eléctrico y CO ₂	Intercambiador de calor EAHE
Boiler de paso	Eléctrico y Gas	Calentador solar

Muro de hormigón armado	CO ₂	Aislamiento de espuma rociada
Pintura	CO ₂	Recubrimiento térmico
Inodoro común	H ₂ O	Inodoro de flujo bajo
Agua suministrada por el estado	H ₂ O	Sistemas de Captación de Agua de Pluvial SCAP

CAPÍTULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL:

El modelado de una vivienda familiar en IFC Builder comienza con la configuración del proyecto. Primero, se definen las unidades de medida, las alturas de nivel y los pisos necesarios, como planta baja, planta alta o azotea. Una vez ajustados estos parámetros iniciales, se procede a dibujar los niveles en la estructura del edificio, asegurándose de reflejar correctamente las dimensiones y alturas reales de la vivienda.

En el modelado arquitectónico, se comienza con los muros. Los muros exteriores se dibujan siguiendo el perímetro de la vivienda, definiendo su grosor, altura y material. Luego, se colocan los muros interiores para delimitar los espacios habitables, como habitaciones, cocina, baños y sala. Posteriormente, se crean los forjados, que representan los pisos y techos de cada nivel, ajustando sus contornos, espesores y materiales de acuerdo con el diseño estructural.

El siguiente paso es la colocación de aberturas. Las puertas y ventanas se insertan en los muros, especificando sus dimensiones y ubicación precisa. Estas aberturas pueden personalizarse según el estilo arquitectónico de la vivienda. Si la vivienda incluye escaleras o rampas, se modelan utilizando las herramientas específicas del software, definiendo su forma, materiales y conectándolas correctamente entre los niveles. Para la cubierta, se dibuja el techo siguiendo las características del diseño, como cubiertas inclinadas a dos o cuatro aguas o techos planos. Se ajustan parámetros como pendientes, espesores y materiales para garantizar que se alineen con el diseño arquitectónico.

Una vez completado el modelado de los elementos principales, se agregan detalles adicionales, como molduras, pérgolas o elementos específicos de instalaciones. Luego, se realiza una revisión integral del modelo 3D para identificar y corregir posibles errores o incoherencias, verificando que todas las dimensiones y propiedades sean correctas.

Finalmente, el modelo completo se exporta en formato IFC, lo que permite integrarlo en otros programas BIM para análisis estructural, cálculos energéticos o coordinación multidisciplinaria. Este proceso asegura un modelo arquitectónico detallado, listo para su uso en un entorno colaborativo BIM.

Utilizado CYPE, BIMserver.center. para evaluar la metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles para comunidades rurales en México, se integran los principios de energía neta cero y el estándar Passivhaus, se describen las variables estudiadas, el diseño del prototipo, los procedimientos de construcción y las técnicas de medición y análisis de datos.

Variables del Estudio

Variables Independientes:

- Tipo de materiales utilizados (locales y sostenibles).
- Diseño arquitectónico (configuración modular y elementos Passivhaus).

Variables Dependientes:

- Consumo energético.
- Temperatura
- Coste de construcción.

Este proceso será aplicado a diferentes materiales de construcción que cumplan con las 7 R de la economía circular y se comparan con materiales base.

Tabla 2. Tabla de materiales sostenibles para la construcción modular

Tipo de material	Origen
Madera Recuperada	Proviene de edificaciones demolidas, pallets y otros productos de madera desechados.
Panel Econfort	Panel de interior de fibras plásticas reciclado, sirve como aislante térmico y acústico sustituyendo materiales que encuentran su naturaleza en recursos NO renovables como el petróleo (Poliestireno UniceL y Poliuretano).
Hormigón, ladrillos y Bloques de Construcción Reciclado	Los ladrillos y bloques reciclados se fabrican a partir de materiales de desecho como vidrio reciclado, cenizas volantes y residuos de construcción. Estos bloques pueden ofrecer propiedades similares a los ladrillos convencionales en términos de resistencia y aislamiento

Para el diseño de la construcción se utiliza el CYPE architecture y el IFC Builder, para los planos en 3D y 2D respectivamente.

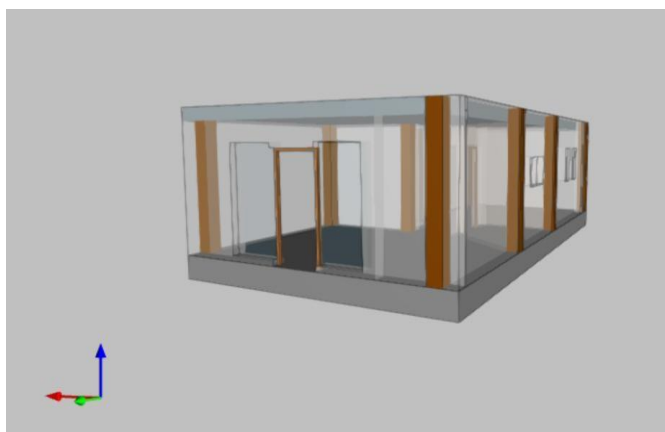


Figura 13. Edificación para análisis diseñada en CYPE Architecture, (BIMserver.center, 2024) elaboración propia.

PROCESO DE ANÁLISIS

- **Recolección de Datos Climáticos:** Los datos climáticos fueron recolectados y comparados para garantizar su precisión y relevancia. Esto incluyó el uso de datos históricos y predicciones a futuro para evaluar el impacto del cambio climático en las necesidades térmicas de las viviendas.
- **Modelado Energético:** Utilizando software de simulación energética, se modelaron las viviendas modulares con los datos de los materiales de construcción y las condiciones climáticas. Este modelado permite prever el comportamiento térmico de las viviendas y ajustar los diseños para maximizar la eficiencia energética.
- **Cálculo de Cargas Térmicas:** Las cargas térmicas, tanto de calefacción como de refrigeración, se calcularon considerando las propiedades de los materiales, la orientación de las viviendas, y la eficiencia de los sistemas de aislamiento y ventanas.

- Optimización del Diseño: Basado en el análisis de cargas térmicas, se realizaron ajustes en el diseño de las viviendas modulares para mejorar su desempeño energético. Esto incluyó la optimización del grosor del aislamiento, la selección de ventanas de alto rendimiento y la integración de sistemas de energía renovable como paneles solares.



3.1 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

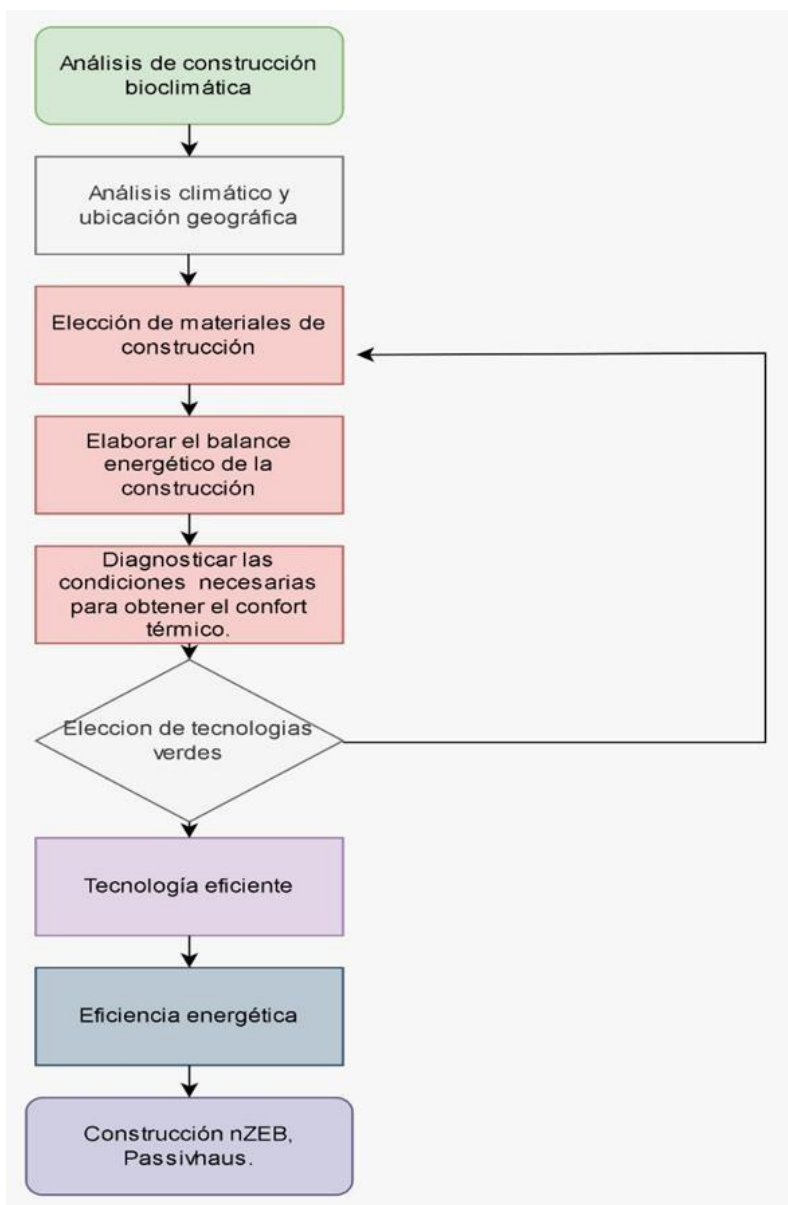


Figura 14. Diagrama de estrategia experimental.

El prototipo de vivienda modular se desarrollará siguiendo estos criterios:

- Materiales: Selección de materiales locales y sostenibles para reducir el impacto ambiental y los costos de transporte.
- Configuración Modular: Diseño que permite una fácil expansión y adaptación a diferentes terrenos y necesidades.
- Energía Neta Cero: Se prioriza el uso de materiales con propiedades térmicas favorables en la envolvente de la vivienda
- Estándar Passivhaus: Implementación de técnicas de construcción que aseguren una alta eficiencia energética, incluyendo un excelente aislamiento, ventanas de alto rendimiento.

Para la fase de diagnóstico y propuesta, se partió de planos obtenidos de dominio público, dicha información fue procesada, modificada y reconstruida en IFC Builder para generar un modelo BIM preciso, el cual sirvió de base para los análisis térmicos en CYPE.

En el ámbito técnico, la CONAVI propone una clasificación tipológica de la vivienda que se utiliza como referencia para planeación, diseño y análisis. Esta clasificación se basa principalmente en la superficie construida, número de espacios y nivel socioeconómico.

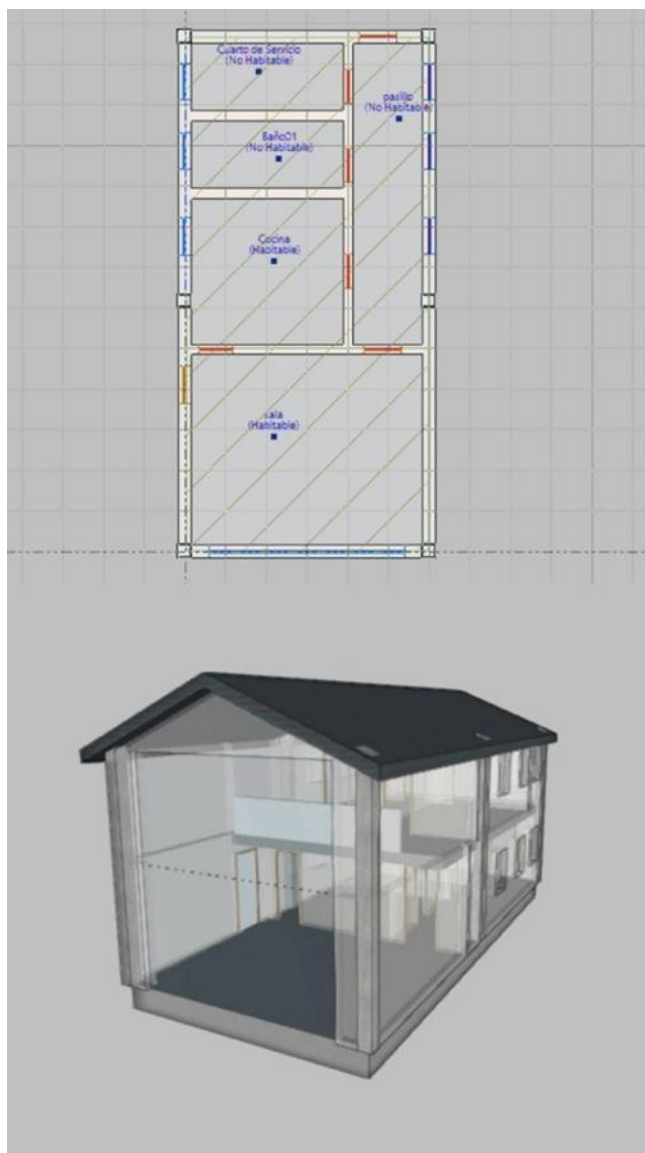


Figura 15. Cabaña modular, elaboración propia en IFC Builder.

En México, la clasificación climática más utilizada en estudios técnicos, basada en Köppen modificada por García, permite identificar nueve climas predominantes, los cuales son fundamentales para análisis bioclimáticos y simulaciones térmicas.



Figura 16. Mapa de los climas predominantes de México INEGI. Modificado

Diseño bioclimático 1: Vivienda modular económica de 30 m².

De acuerdo con la clasificación de la CONAVI



Figura 17. Vista frontal vivienda de la edificación económica de 30 m² propuesta de remodelación estructural.

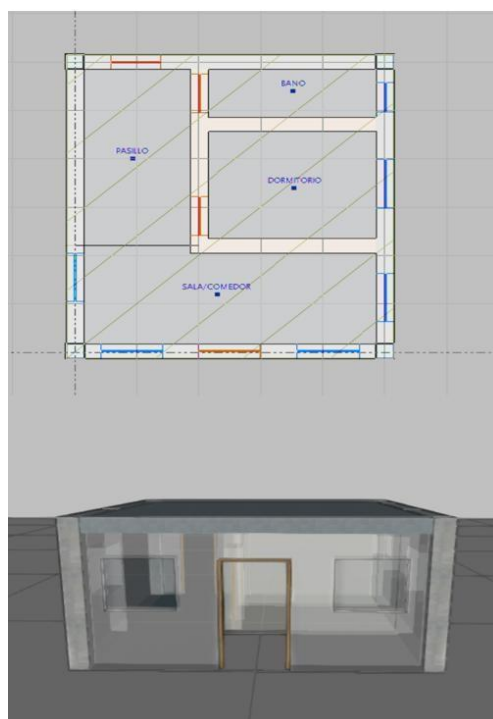


Figura 18. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación económica de 30 m² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

Diseño bioclimático 2: Vivienda modular Popular 42.5 m².

El segundo diseño se realiza de acuerdo con las especificaciones de la CONAVI en una superficie que comprende los 42.5m².

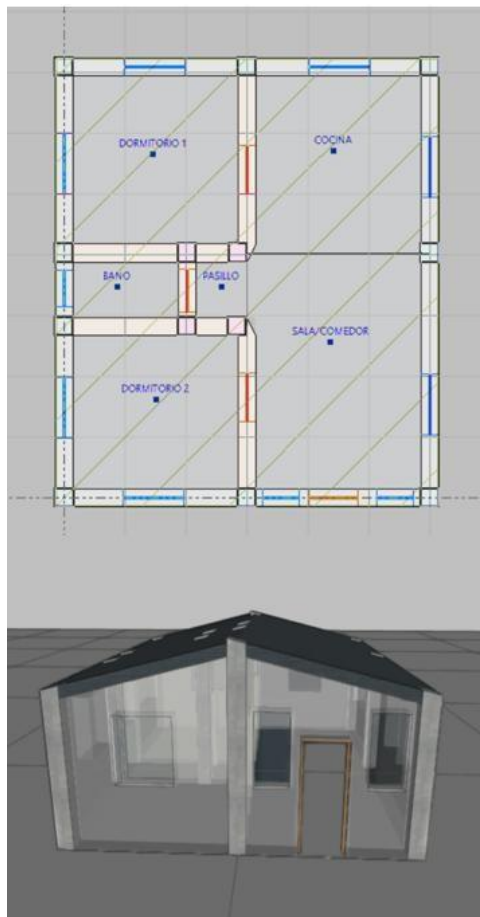


Figura 19. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Popular 42.5 realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

Diseño bioclimático 3: Vivienda modular Tradicional 62.5 m².

El tercer diseño se realiza de acuerdo con las especificaciones de la CONAVI en una superficie que comprende los 62.5m².

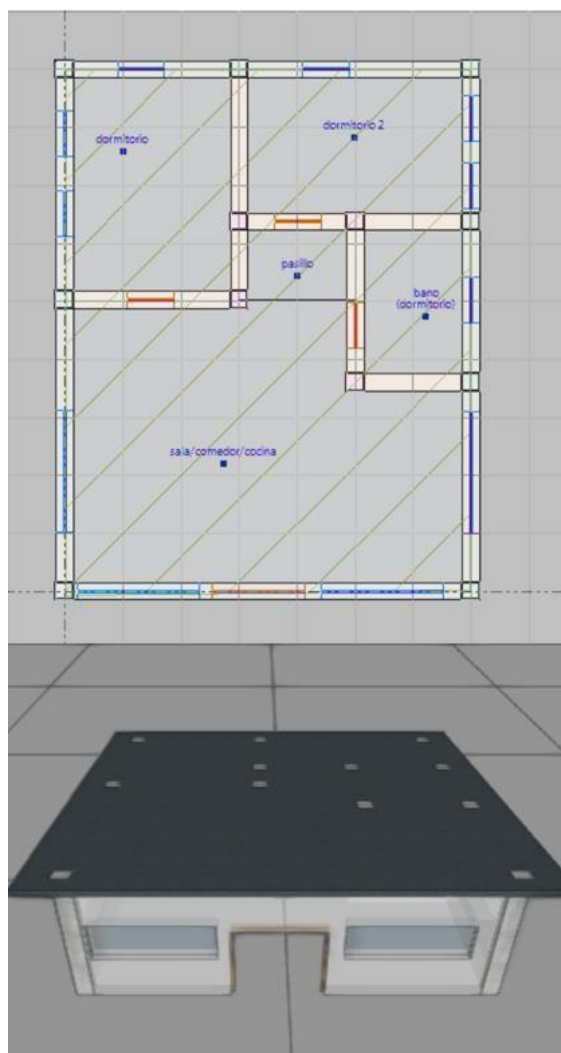


Figura 20. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Tradicional 62.5 m² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

Diseño bioclimático 4: Vivienda modular Media 97.5 m².

El cuarto diseño se realiza de acuerdo con las especificaciones de la CONAVI en una superficie que comprende los 97.5 m².

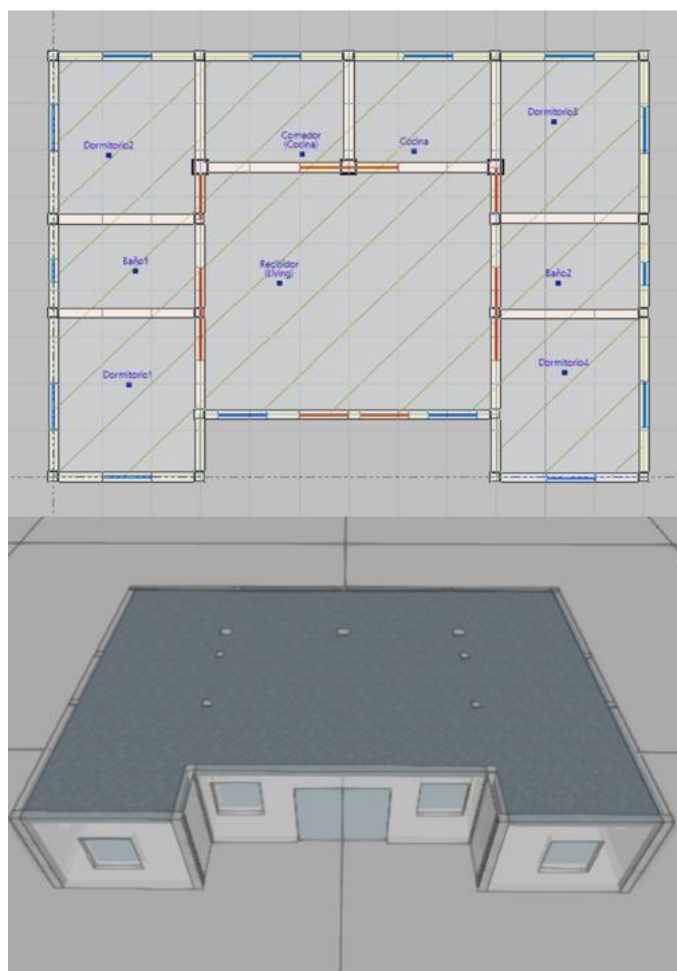


Figura 21. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Media 97.5 m² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

Diseño bioclimático 5: Vivienda modular Residencial 146 m².

El cuarto diseño se realiza de acuerdo con las especificaciones de la CONAVI en una superficie que comprende los 146 m².

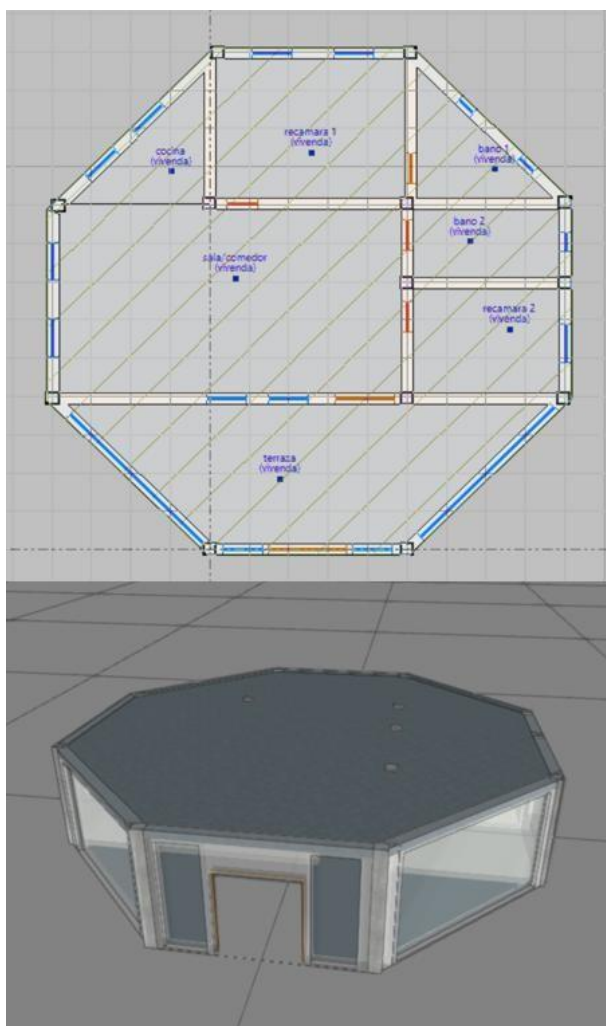


Figura 22. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Residencial 146 m² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

Diseño bioclimático 6: Vivienda modular Residencial Plus 225 m².

El cuarto diseño se realiza de acuerdo con las especificaciones de la CONAVI en una superficie que comprende los 225 m².

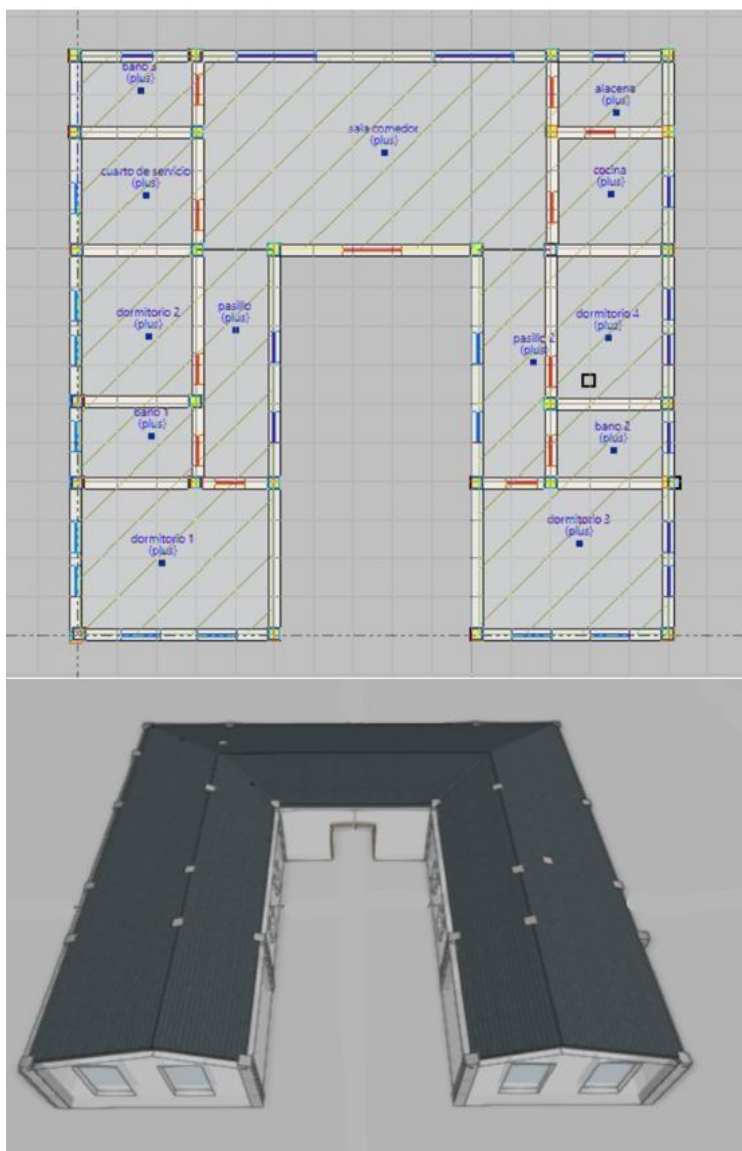


Figura 23. Propuesta de remodelación estructural plantas 2D y volumetría 3D de la edificación Residencial Plus 225m² realizados en IFC Builder basada en planimetría de origen digital (s.f.)

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Análisis de cargas térmicas en los casos de estudio.

El presente análisis de cargas térmicas fue realizado empleando el software CYPETherm LOADS, integrado al flujo de trabajo colaborativo de BIMserver.center. Esta herramienta permitió calcular, de manera precisa y automatizada, las cargas térmicas de calefacción y refrigeración en los modelos arquitectónicos de los casos de estudio. La metodología aplicada se basó en los estándares de la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) y consideró datos climáticos específicos del sitio, obtenidos directamente desde el banco de datos meteorológicos incluido en el entorno CYPE, así como las condiciones de temperatura seca de diseño para la localidad analizada.

Resultados y análisis térmico comparativo.

En esta sección se presentan los resultados del análisis térmico realizado mediante simulaciones computacionales en CYPETHERM LOADS, considerando el promedio de todas las tipologías de vivienda y los cinco materiales evaluados en nueve climas representativos de México.

Los gráficos muestran las cargas térmicas máximas promedio de refrigeración y calefacción, lo que permite identificar el impacto del material constructivo sobre la demanda energética en distintos contextos climáticos. El análisis comparativo evidencia la influencia directa de la conductividad térmica, la resistencia y la inercia térmicas de los materiales en el desempeño global de la envolvente arquitectónica.

4.2 Análisis Comparativo de Cargas Térmicas por Clima, Vivienda y Material.

Clima: Cálido Húmedo.

En el clima cálido húmedo, caracterizado por temperaturas elevadas y alta humedad relativa durante la mayor parte del año, la demanda energética se concentra predominantemente en refrigeración. Los resultados muestran que el ecopanel registra las menores cargas térmicas promedio, seguido por la madera recuperada y el concreto reciclado. En contraste, el concreto convencional y el cemento Portland presentan las cargas más elevadas, reflejando una mayor ganancia de calor por conducción a través de la envolvente.

En el clima cálido húmedo, debido a las condiciones higrotérmicas del sitio, donde las temperaturas mínimas históricas se mantienen dentro o por encima del rango de confort térmico, las cargas máximas de calefacción se consideran despreciables, el diseño se centra exclusivamente en la carga de refrigeración y el control de la humedad relativa para garantizar la habitabilidad (figura 24).

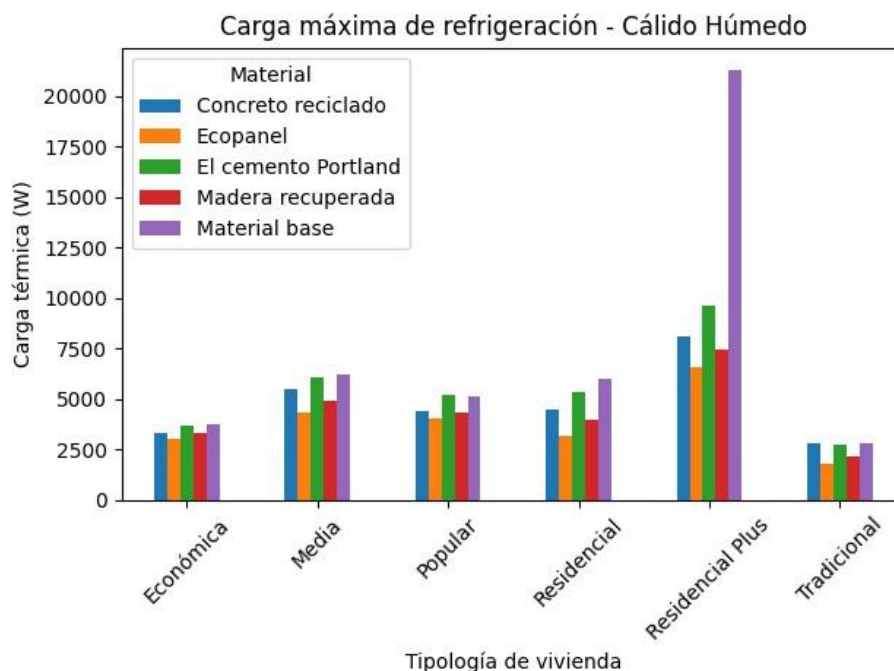


Figura 24. Comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados en el clima cálido húmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS.

Clima: Cálido Subhúmedo.

En el clima cálido subhúmedo se mantiene una alta demanda de refrigeración, aunque comienzan a registrarse requerimientos moderados de calefacción. El ecopanel continúa mostrando el mejor desempeño térmico integral, reduciendo tanto la carga de enfriamiento como la de calefacción respecto a los materiales convencionales (figura 25).

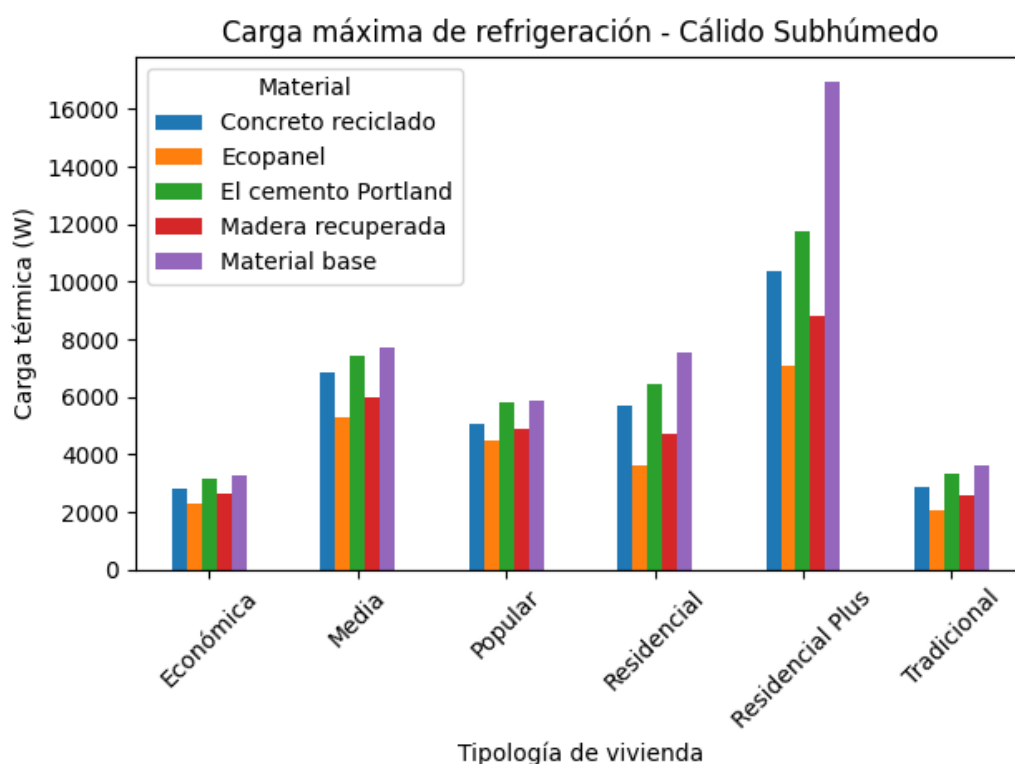


Figura 25. Comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados para el clima cálido subhúmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS.

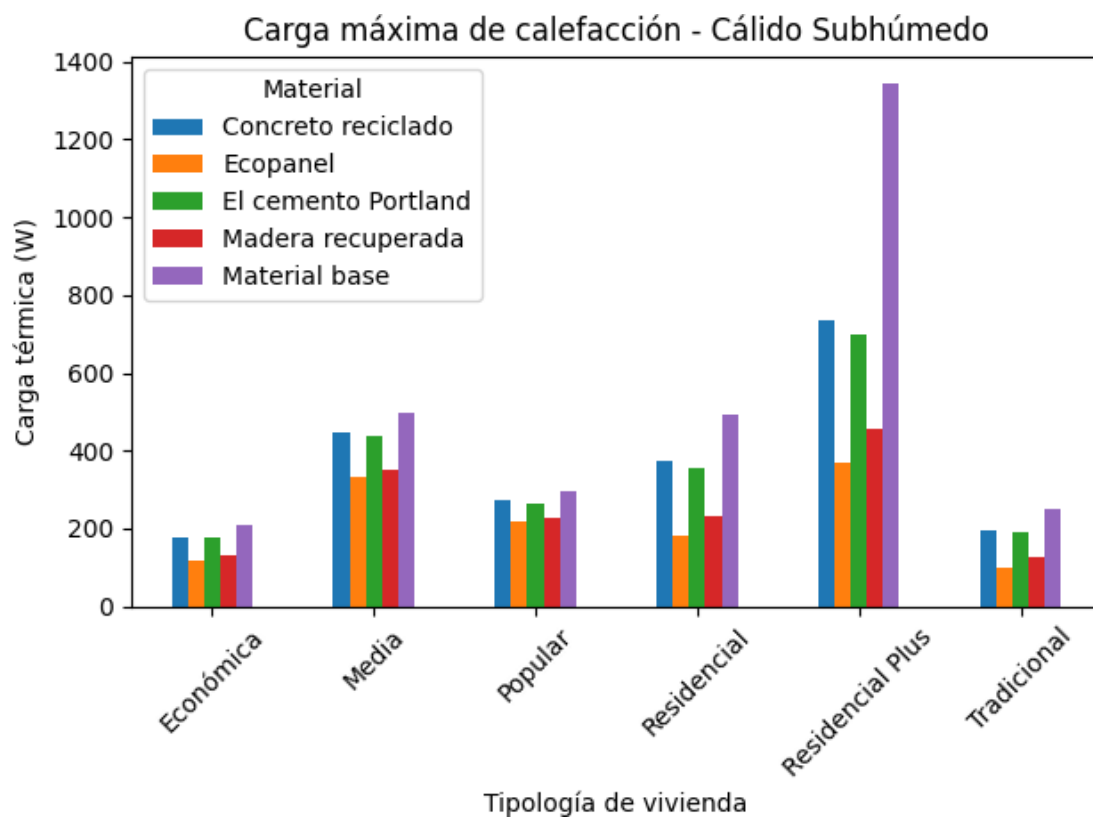


Figura 26. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior para el clima cálido subhúmedo mediante simulación en CYPETHERM LOADS.

Clima: Frío.

En el clima frío, la carga predominante corresponde a calefacción. El ecopanel presenta la menor carga térmica promedio, evidenciando una reducción significativa de pérdidas de calor hacia el exterior. Los materiales tradicionales registran mayores requerimientos energético.

En el escenario de clima frío, las cargas de refrigeración se consideran inexistentes. Debido a que no hay un exceso de calor interno que se necesite disipar.

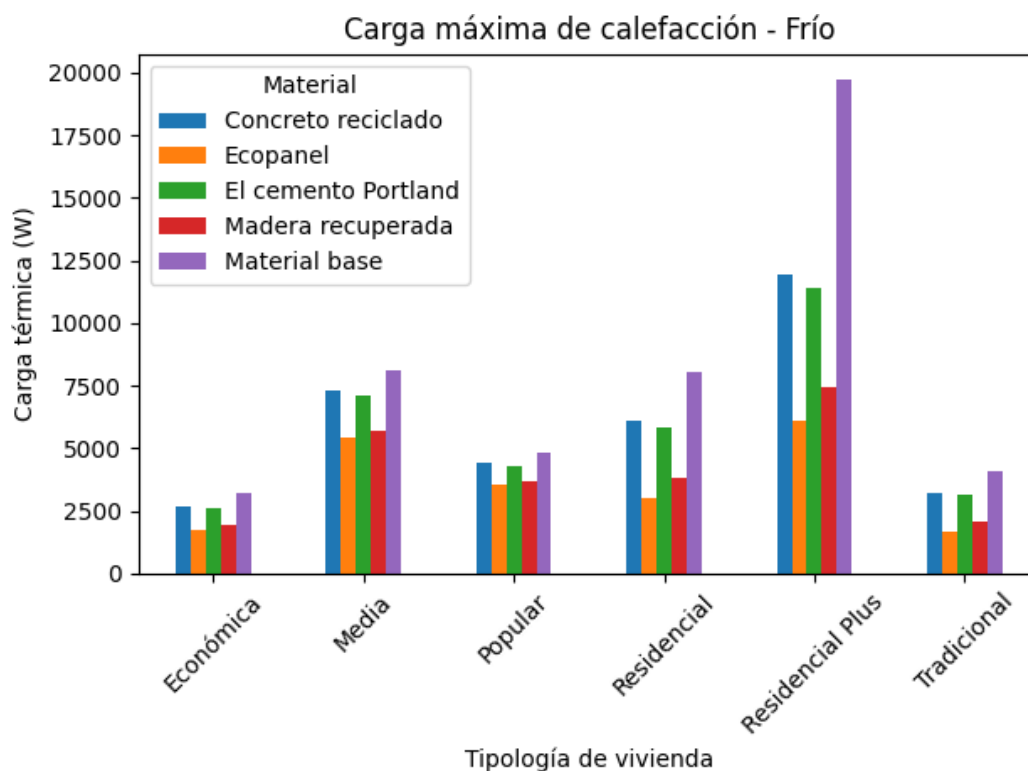


Figura 27. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en el clima frío.

Clima: Semifrío.

En el clima semifrío se observa una ventaja clara de los materiales ecológicos en la reducción de la carga de calefacción. El uso de materiales con menor conductividad térmica permite estabilizar la temperatura interior y disminuir la dependencia de sistemas activos.

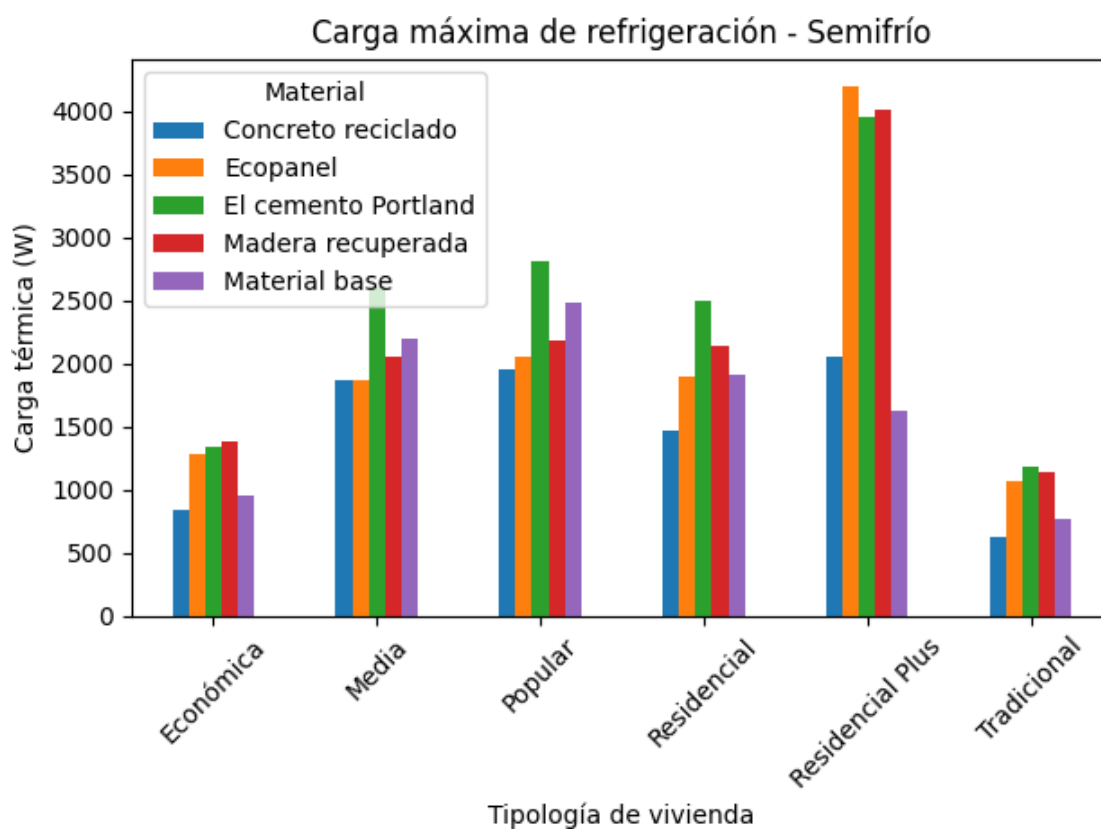


Figura 28. Comparación de cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semifrío.

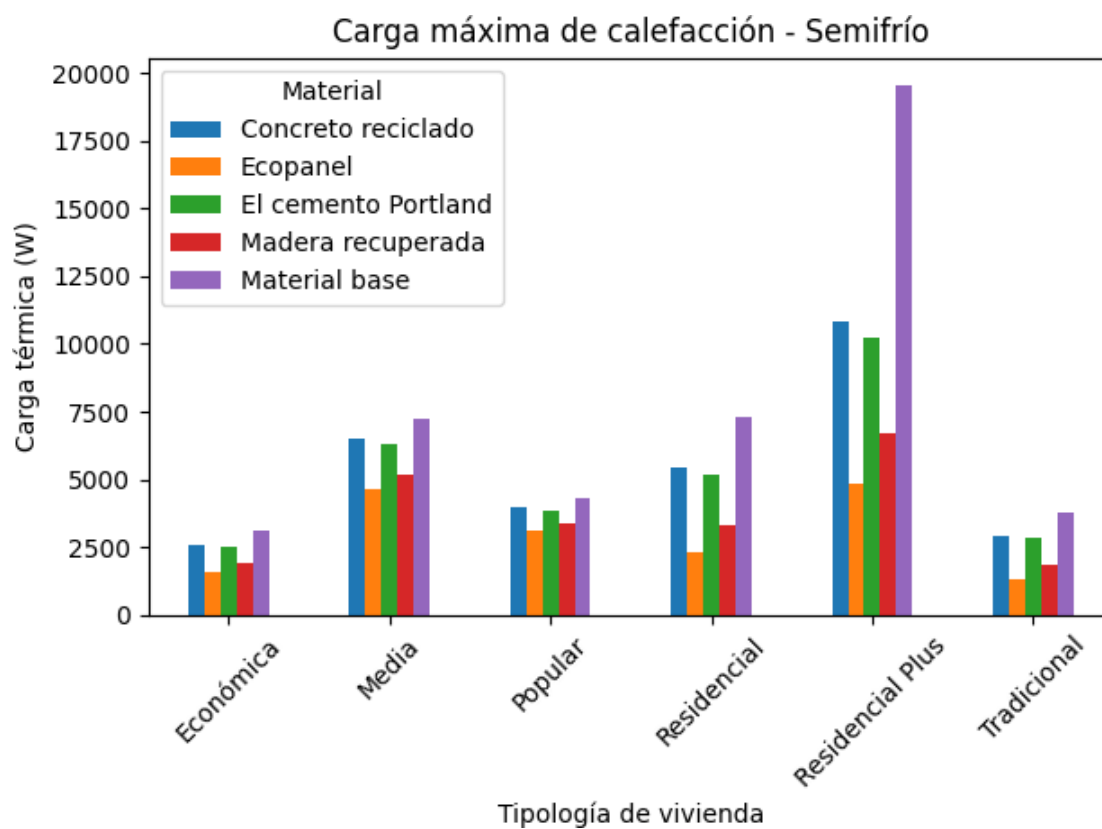


Figura 29. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior, mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semifrío

Clima: Templado Húmedo.

En el clima templado húmedo, la demanda energética se distribuye de manera equilibrada entre refrigeración y calefacción. El ecopanel mantiene el mejor desempeño térmico promedio, mostrando reducción simultánea en ambas cargas.

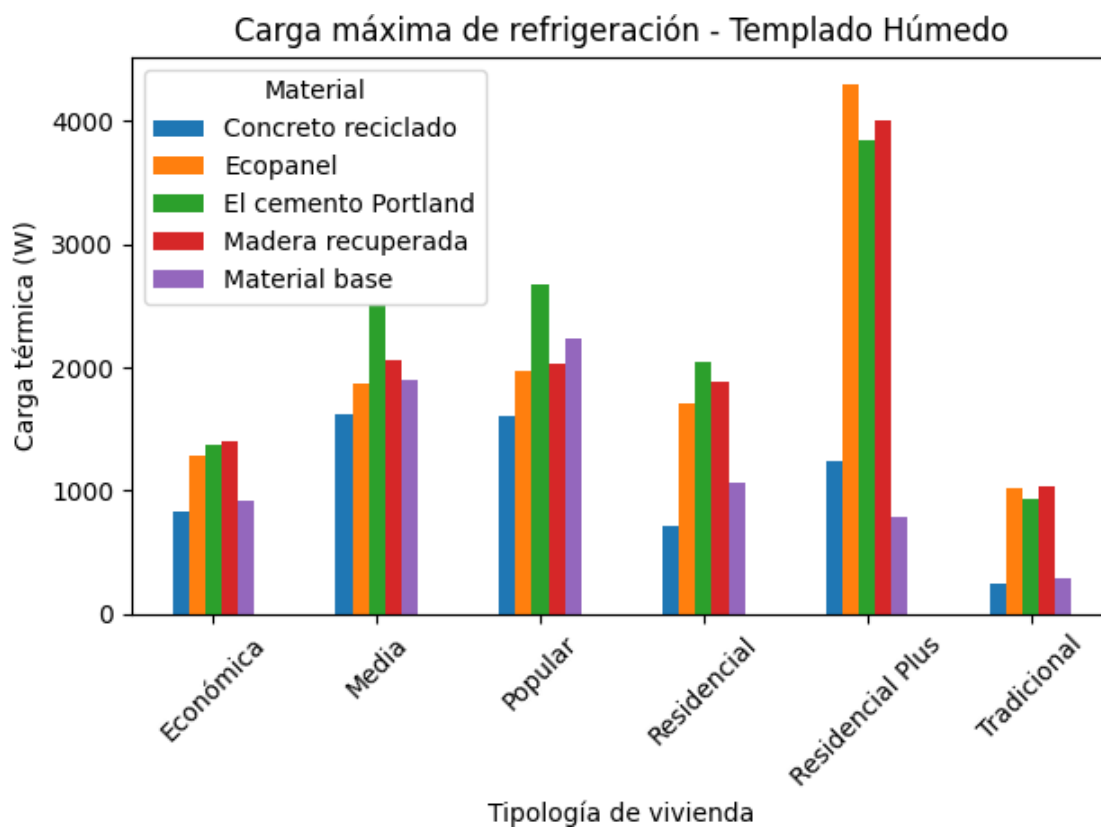


Figura 30. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS, para clima templado húmedo.

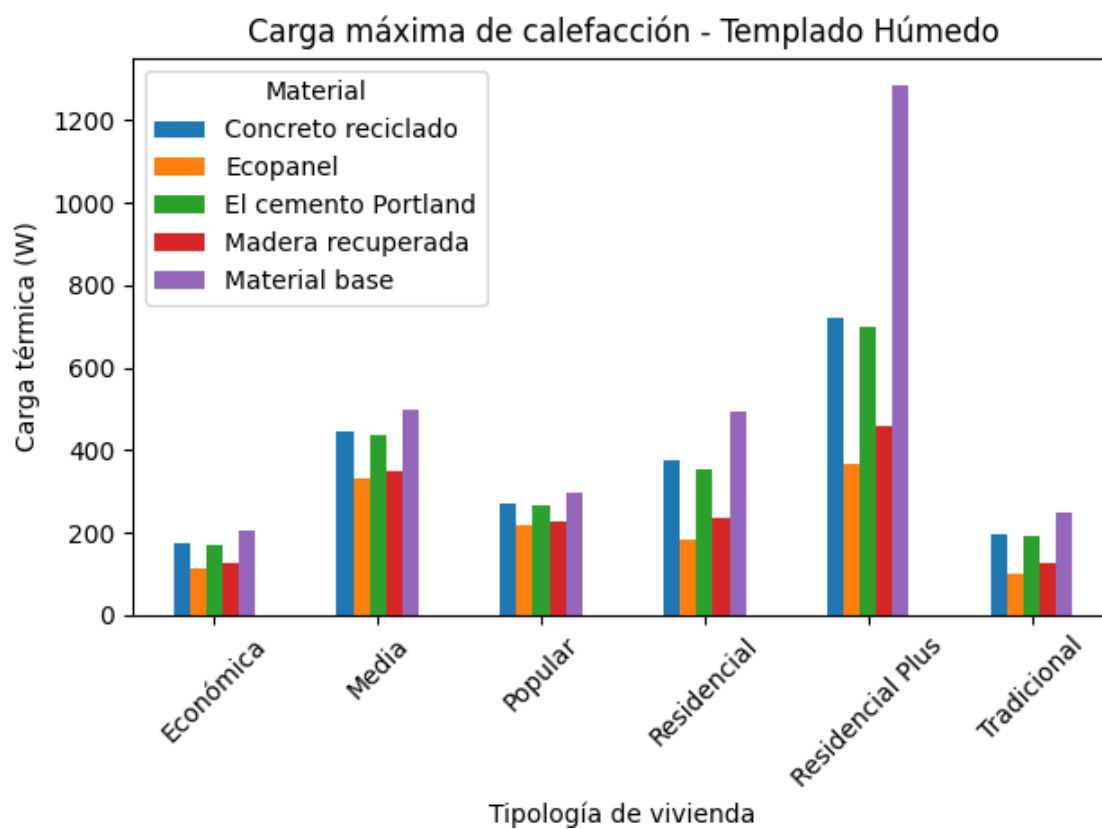


Figura 31. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior, para clima templado húmedo.

Clima: Templado subhúmedo.

El clima templado subhúmedo presenta una condición intermedia donde la demanda térmica es relativamente baja. No obstante, los materiales ecológicos continúan ofreciendo ventajas energéticas en términos porcentuales.

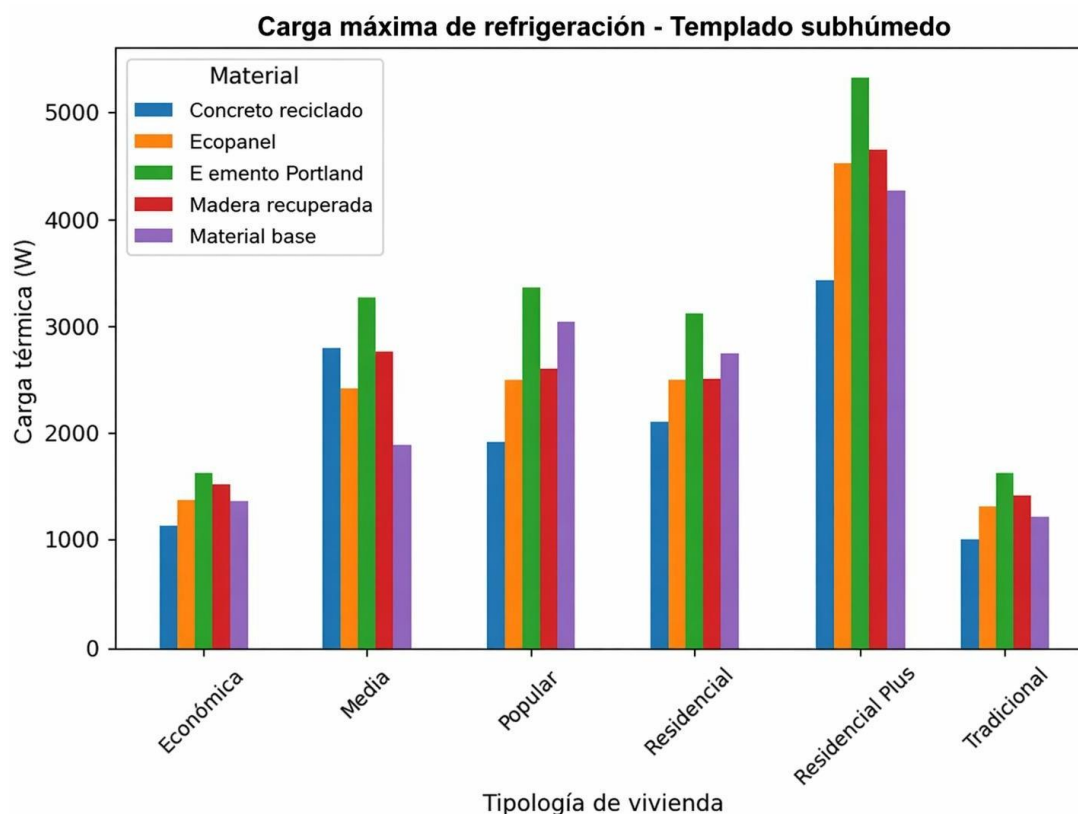


Figura 32. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS, para clima templado subhúmedo.

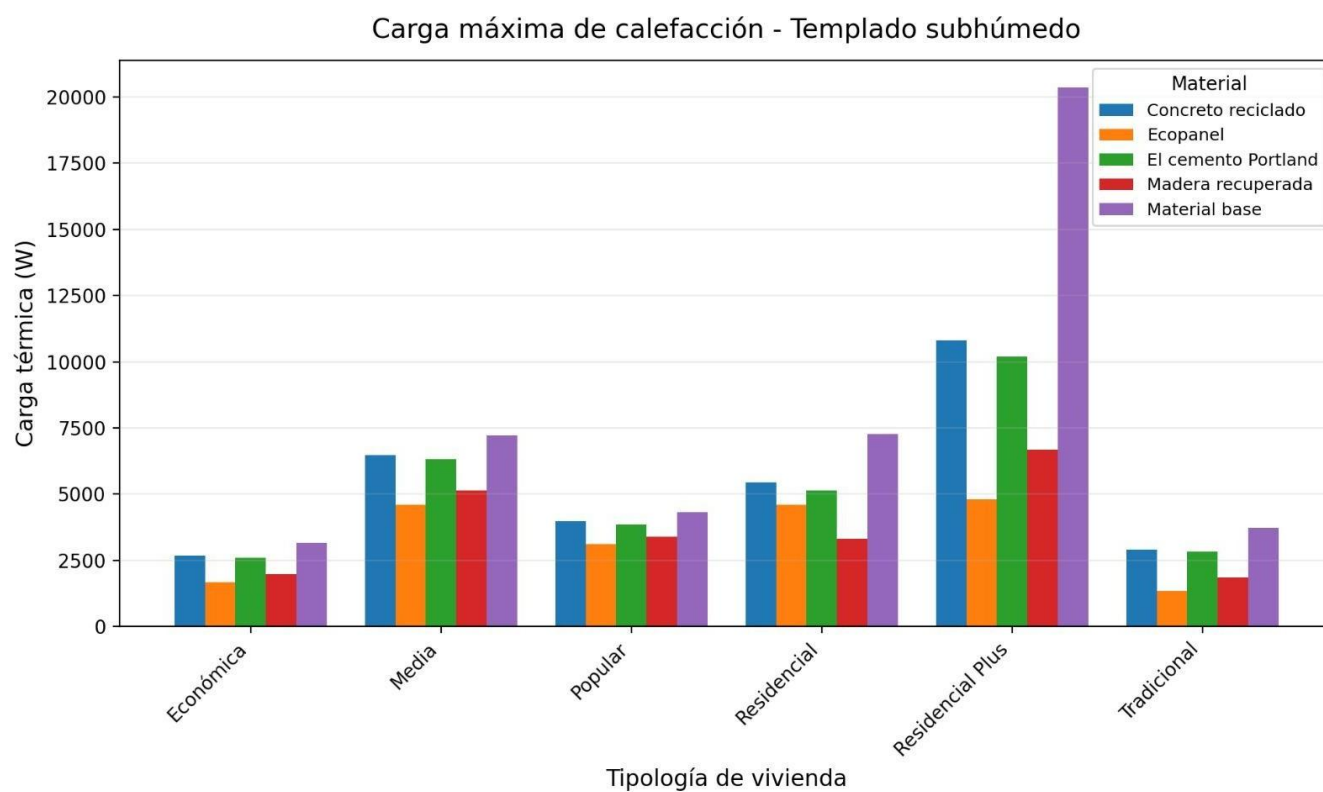


Figura 33. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS, para clima templado subhúmedo.

Clima: Seco.

En el clima seco, caracterizado por alta amplitud térmica diaria, se registran demandas significativas tanto de refrigeración como de calefacción. El ecopanel demuestra un desempeño superior al reducir las variaciones térmicas interiores.

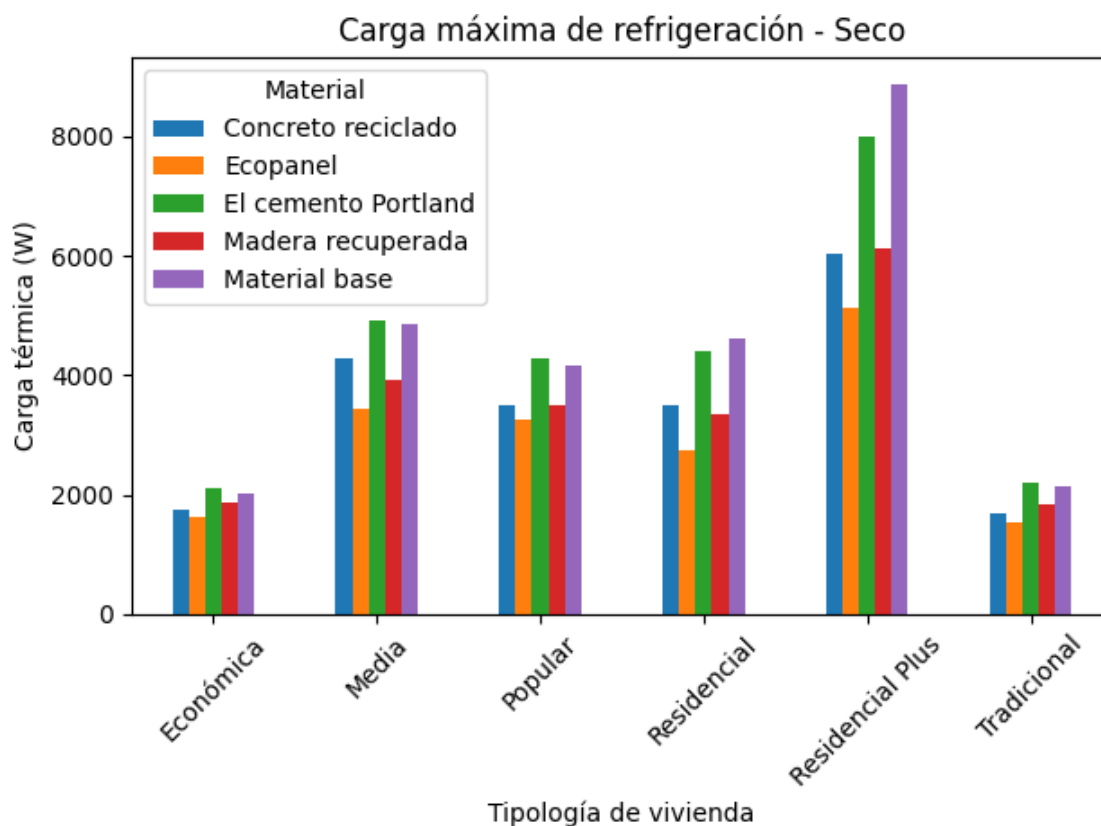


Figura 34. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima seco.

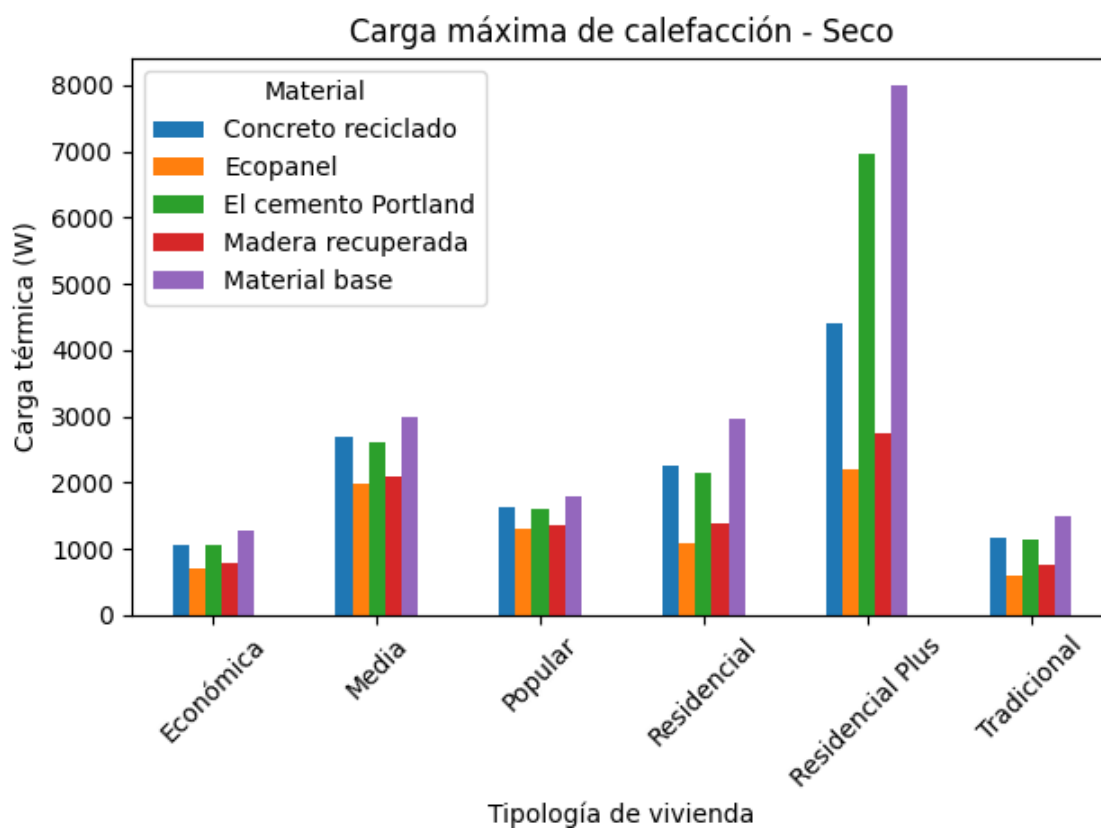


Figura 35. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior. en CYPETHERM LOADS en clima seco.

Clima: Semiseco.

En el clima semiseco, los materiales ecológicos mantienen un mejor comportamiento energético promedio, particularmente en la reducción de cargas de refrigeración.

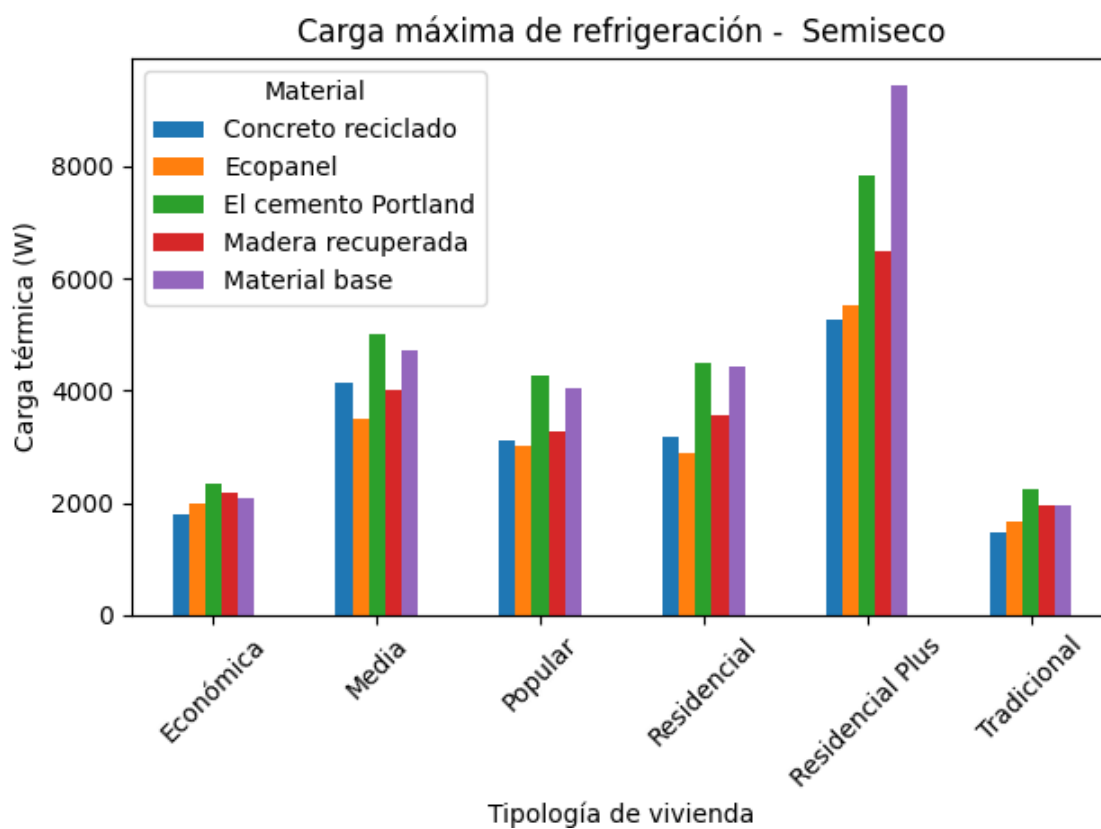


Figura 36. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima semiseco.

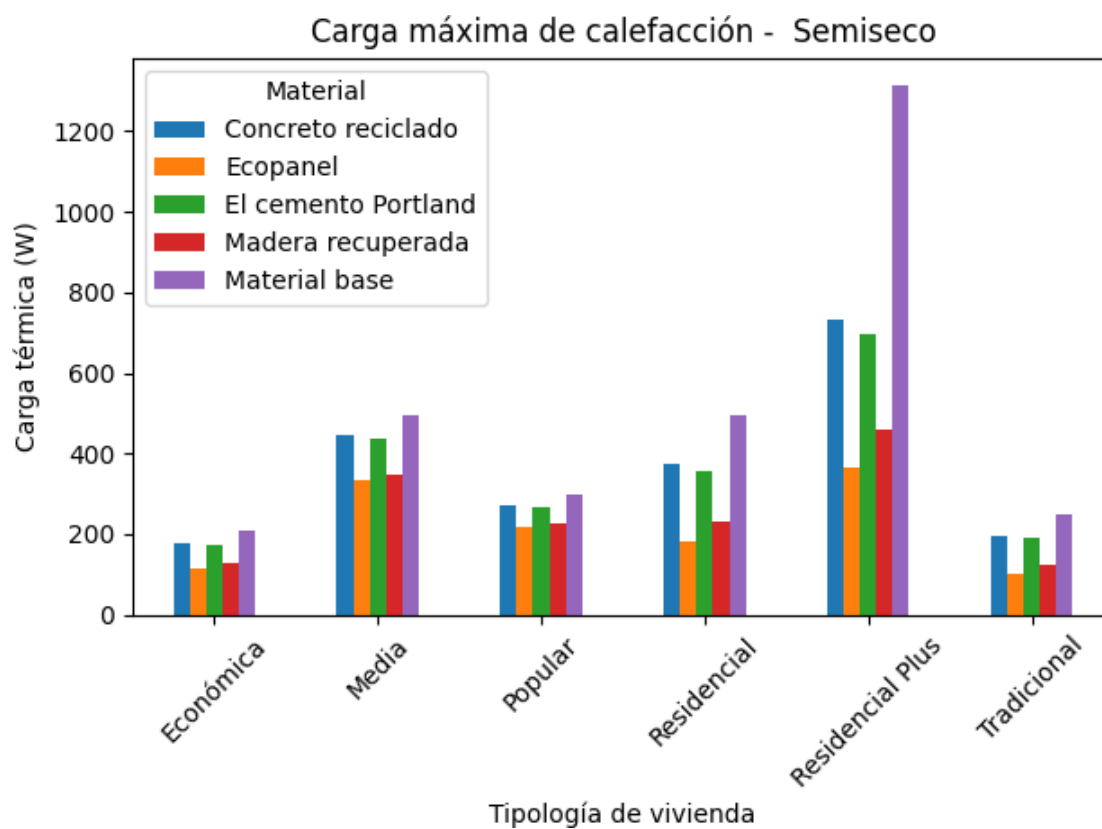


Figura 37. Cargas máximas de calefacción requeridas para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS en clima semiseco.

Clima: Muy Seco

En el clima muy seco, donde la radiación solar y las variaciones térmicas son más intensas, el ecopanel presenta la menor demanda energética promedio, reafirmando la importancia de seleccionar materiales con propiedades térmicas optimizadas.

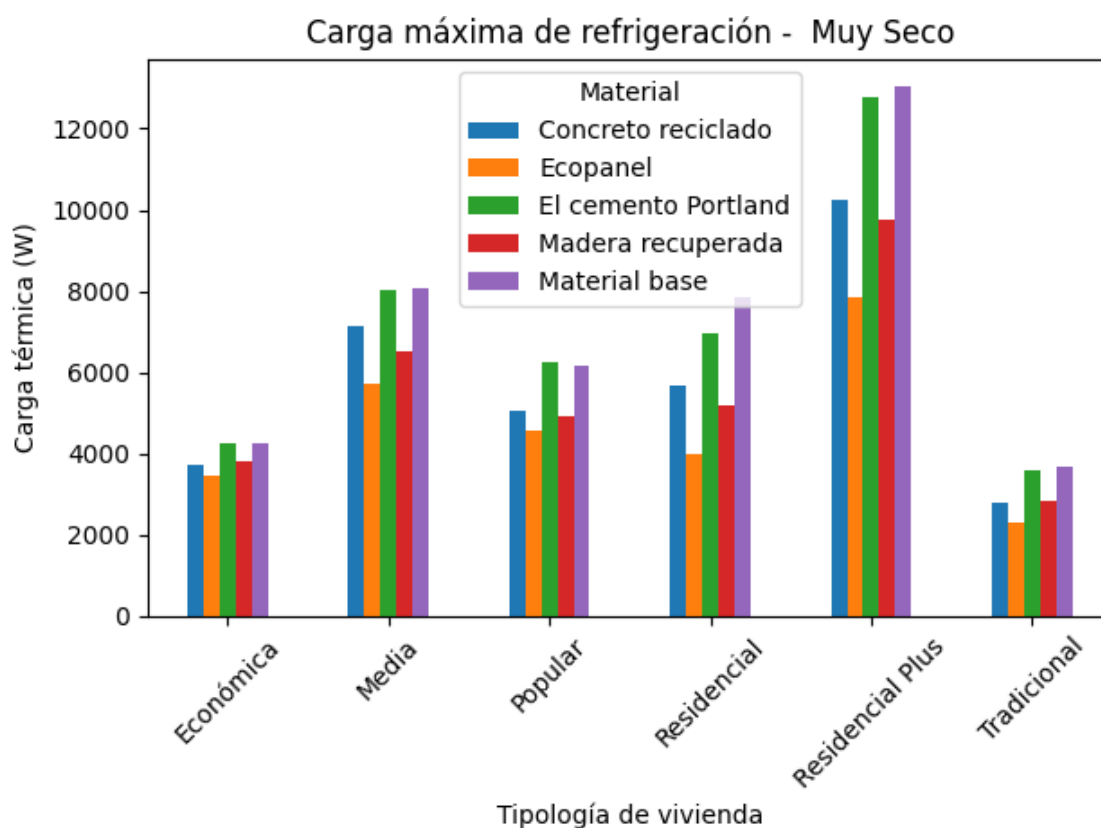


Figura 38. Cargas máximas de refrigeración para cada tipología de vivienda considerando los cinco materiales evaluados mediante simulación en CYPETHERM LOADS en clima muy seco.

Resultado comparativo multiclima.

El análisis integral de los nueve climas confirma que el ecopanel presenta el mejor desempeño térmico global. La madera recuperada y el concreto reciclado muestran mejoras respecto a los materiales tradicionales, mientras que el concreto convencional y el cemento Portland registran las mayores cargas térmicas promedio. Las diferencias son más pronunciadas en climas extremos, lo que demuestra que el impacto del material es más relevante bajo condiciones ambientales severas.

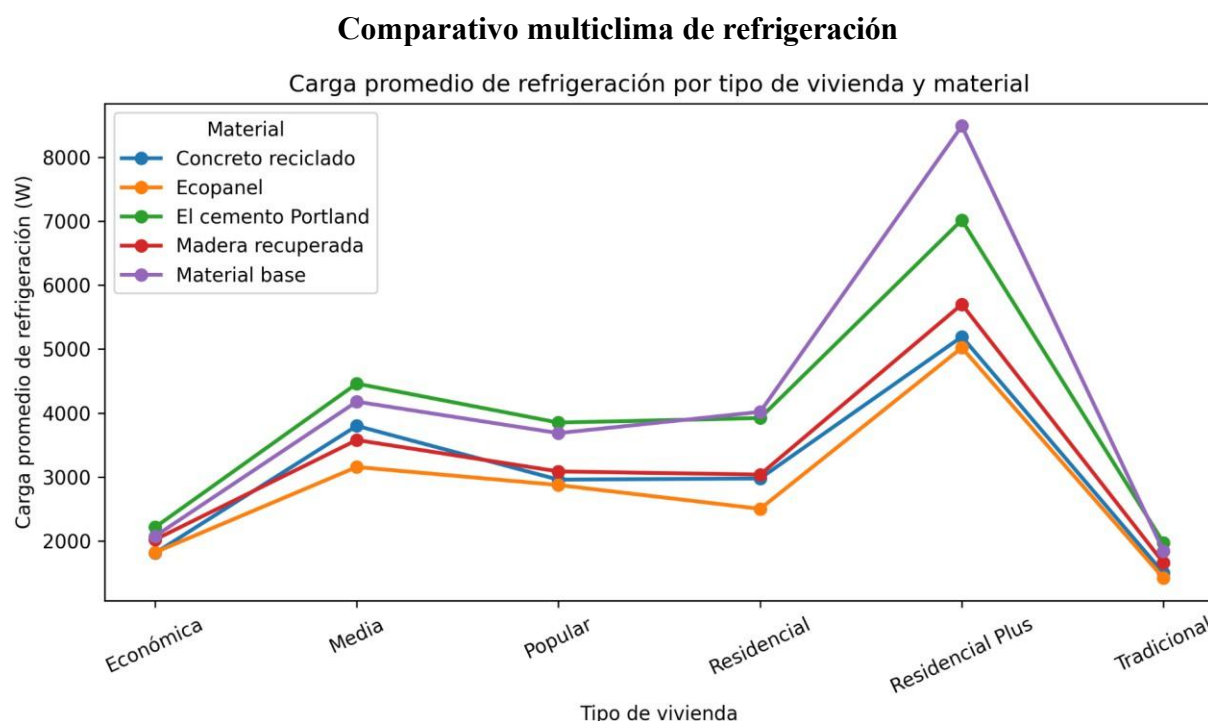


Figura 39. Cargas máximas de refrigeración de análisis integral de los nueve climas requeridos para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS.

Comparativo multiclima de refrigeración Calefacción.

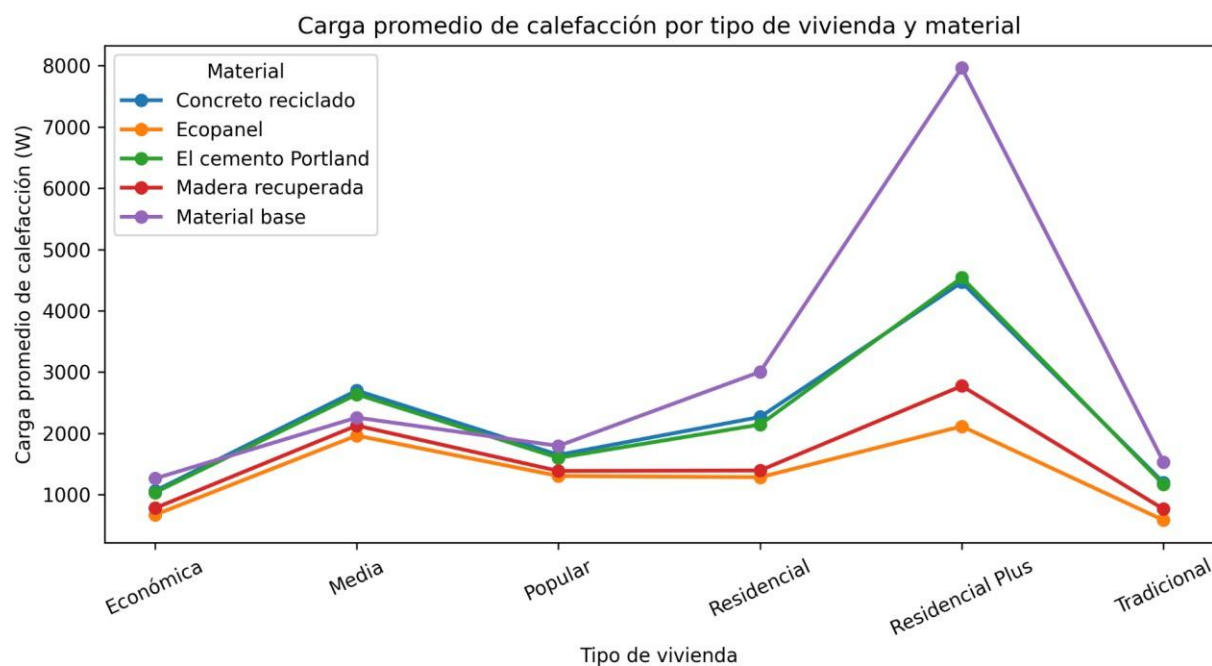


Figura 40. Cargas máximas de calefacción de análisis integral de los nueve climas requeridos para mantener condiciones de confort térmico interior en CYPETHERM LOADS

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de refrigeración (material base).

El material base presenta una mayor demanda de refrigeración en climas cálidos húmedos y cálidos subhúmedos, mostrándose en el mapa de calor en tonos amarillos y especialmente en viviendas del tipo Residencial Plus, donde se alcanzan picos máximos de $>20,000$ W. Se interpreta que la alta temperatura y humedad incrementan significativamente la necesidad de enfriamiento y confirma que la superficie construida y volumen inferior influyen directamente en la demanda energética: a mayor superficie, mayor carga térmica acumulada.

Se observa que el uso de materiales convencionales genera altas cargas de refrigeración, especialmente en climas cálidos y en viviendas de mayor tamaño, lo que implica un mayor consumo energético (figura 41).

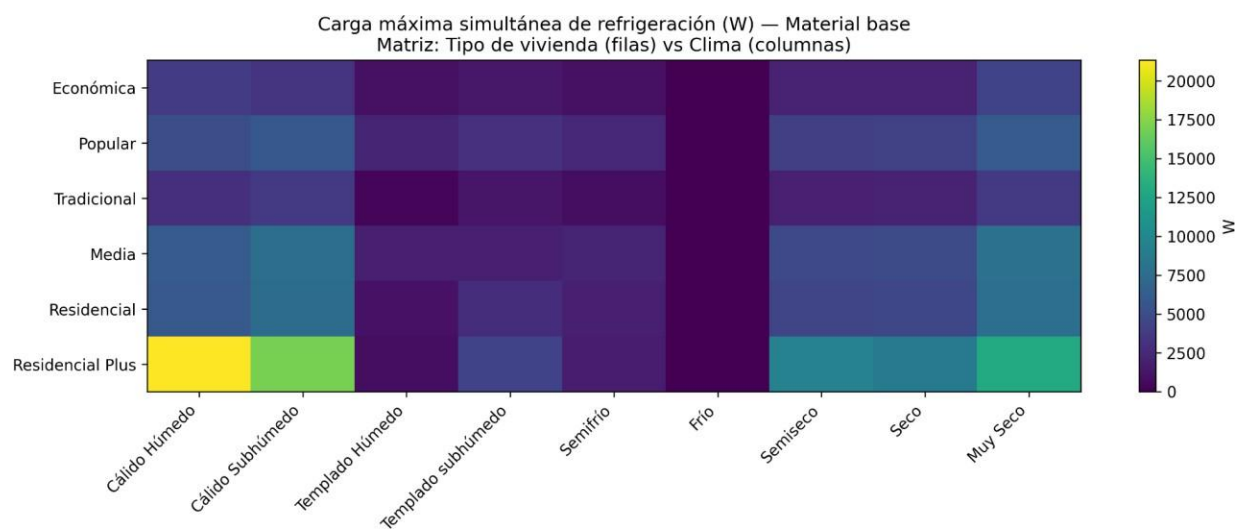


Figura 41. Distribución de la carga máxima de refrigeración para distintas tipologías de vivienda bajo el uso de materiales convencionales.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de refrigeración (cemento portland).

No obstante, al uso ampliamente extendido de cemento portland, este no garantiza un desempeño térmico eficiente en la envolvente de la edificación ya que presenta elevadas cargas de refrigeración en climas cálidos y secos, esto evidencia la necesidad de incluir materiales alternativos que presenten mejores propiedades y permitan reducir la demanda energética en las edificaciones habitacionales (figura 42).

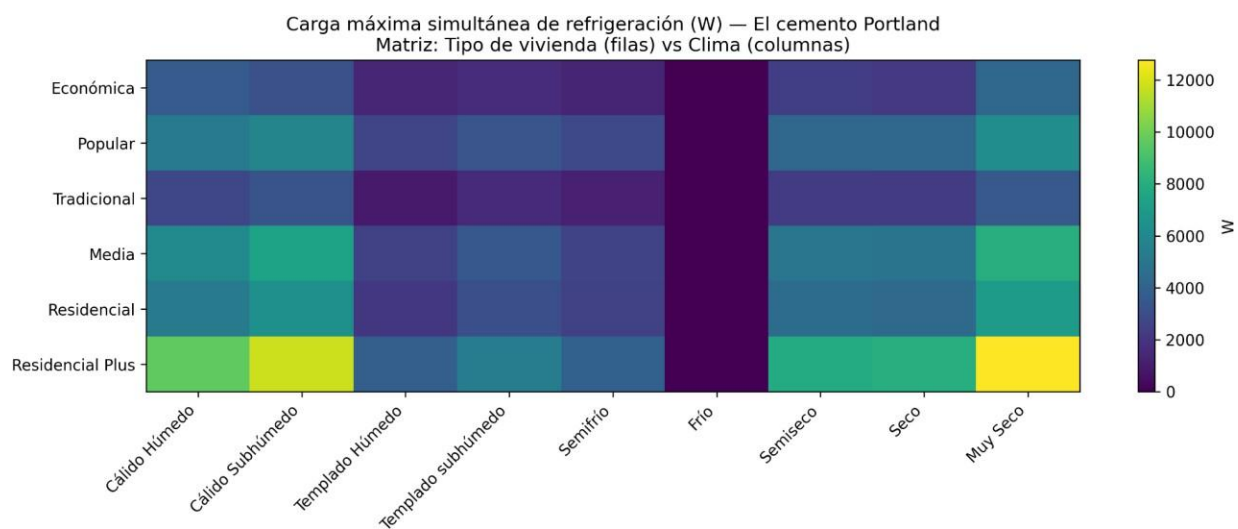


Figura 42. Distribución de la carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con cemento Portland.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de refrigeración (concreto reciclado).

Los resultados muestran una reducción moldeada en la demanda energética utilizando el concreto reciclado comparándola con los materiales convencionales en particular en climas cálidos y templados esto se puede atribuir a que el material permite una menor transferencia de calor hacia el interior de la vivienda sin embargo en climas extremos como el cálido húmedo y muy seco dichas cargas continúan siendo elevadas y especialmente en tipologías de mayor superficie estos resultados indican que, si bien el concreto reciclado mejora el desempeño térmico, su efectividad depende de su integración con estrategias pasivas de diseño en la envolvente.

Los ecomateriales, como el concreto reciclado, presentan un mejor comportamiento térmico en comparación con materiales convencionales, reduciendo la demanda de refrigeración en distintos climas (figura 43).

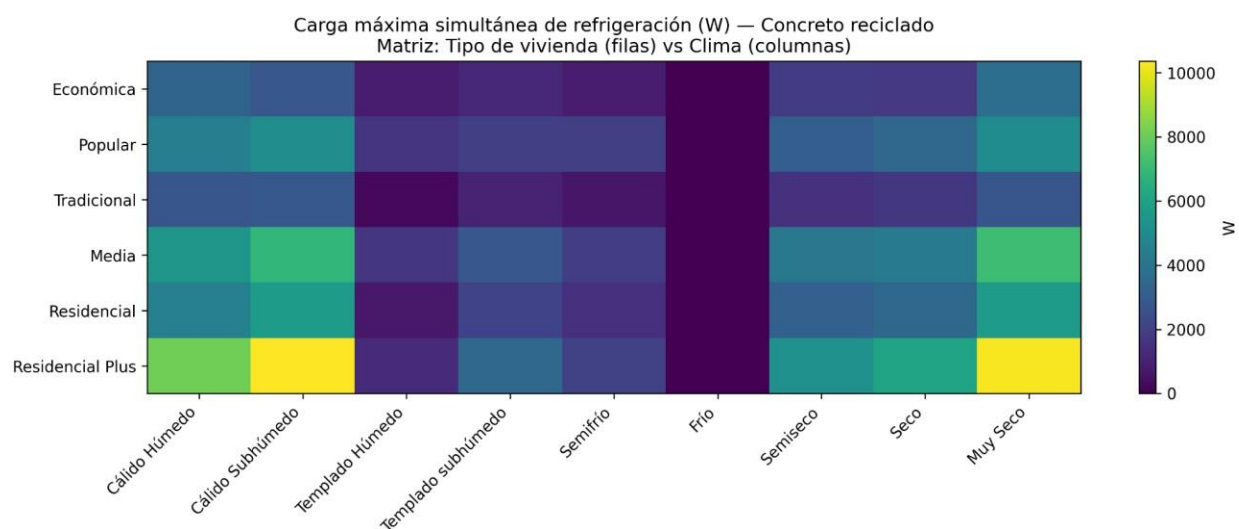


Figura 43. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con concreto reciclado.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de refrigeración (madera recuperada).

La madera recuperada presenta una reducción significativa en la demanda energética en comparación con los materiales convencionales, y en particular en climas cálidos y templados, este comportamiento se debe a la baja conductividad térmica de la madera la cual actúa como un aislante natural y limita la transferencia de calor. sin embargo, en climas extremos como el muy seco, las cargas térmicas siguen siendo elevadas en tipologías de mayor tamaño (figura 44).

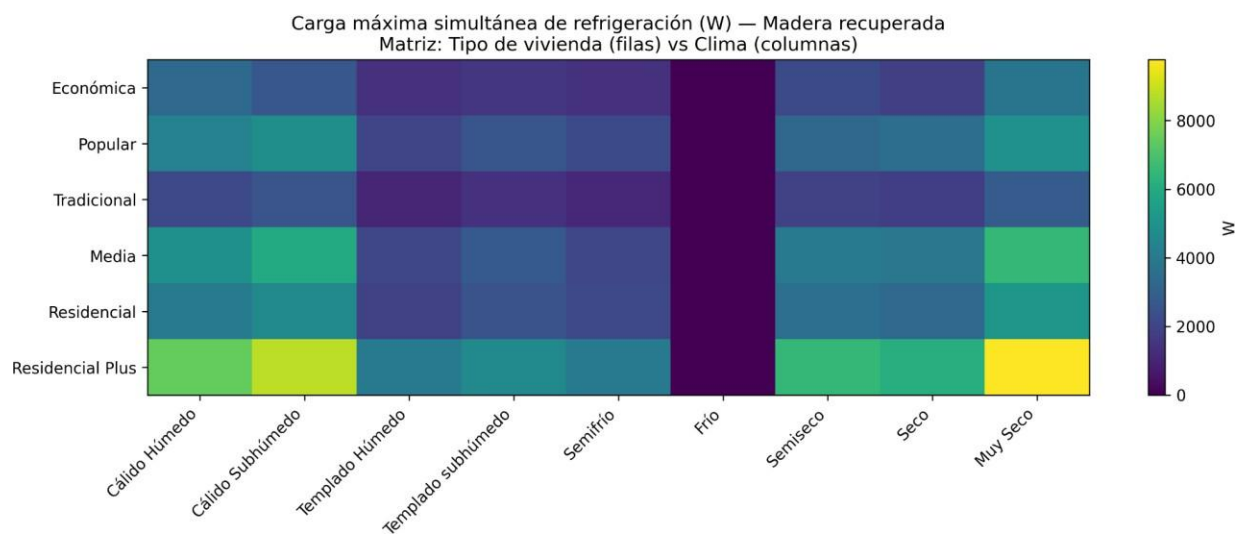


Figura 44. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con madera recuperada.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de refrigeración (ecopanel).

Los datos arrojan que el ecopanel presenta una reducción sistemática del gasto energético en comparación con los materiales convencionales y demás materiales ecológicos analizados. Estos hallazgos se atribuyen a sus propiedades aislantes, que limitan eficazmente la transferencia de calor. En climas cálidos y muy secos, donde se presentan las condiciones más críticas, el ecopanel mantiene los valores más bajos de carga térmica, incluso en tipologías de mayor superficie. Estos resultados posicionan al ecopanel como la alternativa más eficiente para el diseño de envolventes en viviendas modulares sostenibles analizados en el presente proyecto (figura 45).

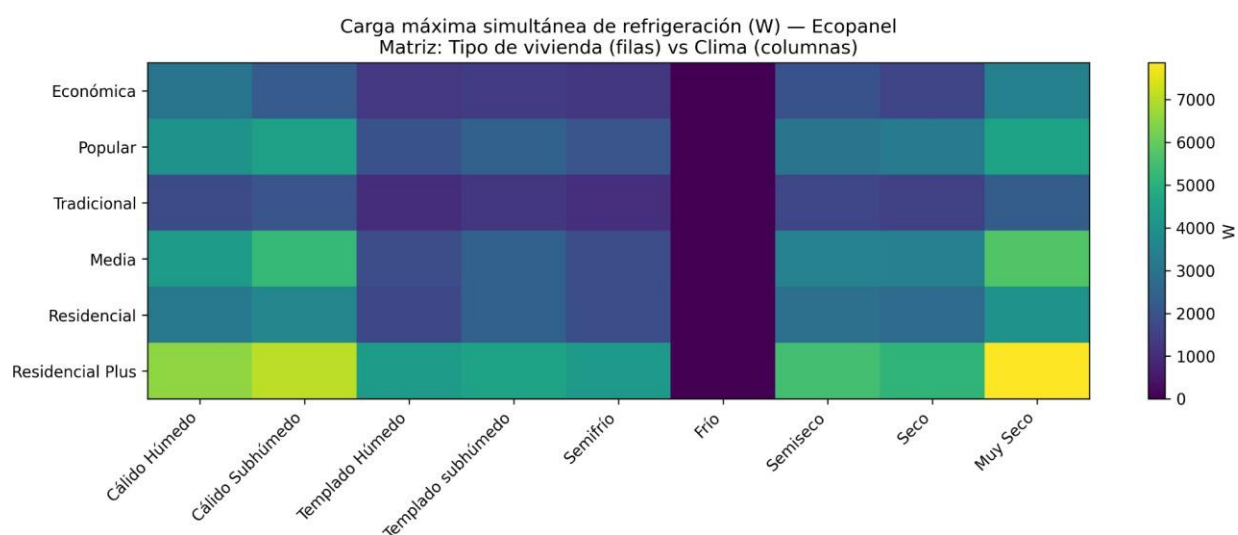


Figura 45. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con Ecopanel.

Tabla 3. Reducción real de la carga máxima de refrigeración por material.

Material	Reducción (%)	Desempeño térmico	Observaciones técnicas
Material base	0.00%	Deficiente	Referencia de comparación
Madera recuperada	18.60%	Medio–alto	Buen comportamiento aislante, pero menor al esperado en todos los climas
Concreto reciclado	22.20%	Alto	Mejora por propiedades térmicas y porosidad
Ecopanel	28.36%	Muy alto	Mejor desempeño global por su capacidad aislante

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de Calefacción (Material base).

El análisis de la carga máxima de calefacción para el material base evidencia una fuerte dependencia tanto del clima como de la tipología de vivienda. En climas cálidos, la demanda es prácticamente nula, mientras que en climas templados y fríos se incrementa significativamente, alcanzando valores máximos en viviendas de mayor superficie, particularmente en la tipología residencial plus. Este comportamiento confirma que el material base presenta una baja eficiencia térmica, generando mayores pérdidas de calor en climas fríos (figura 46).

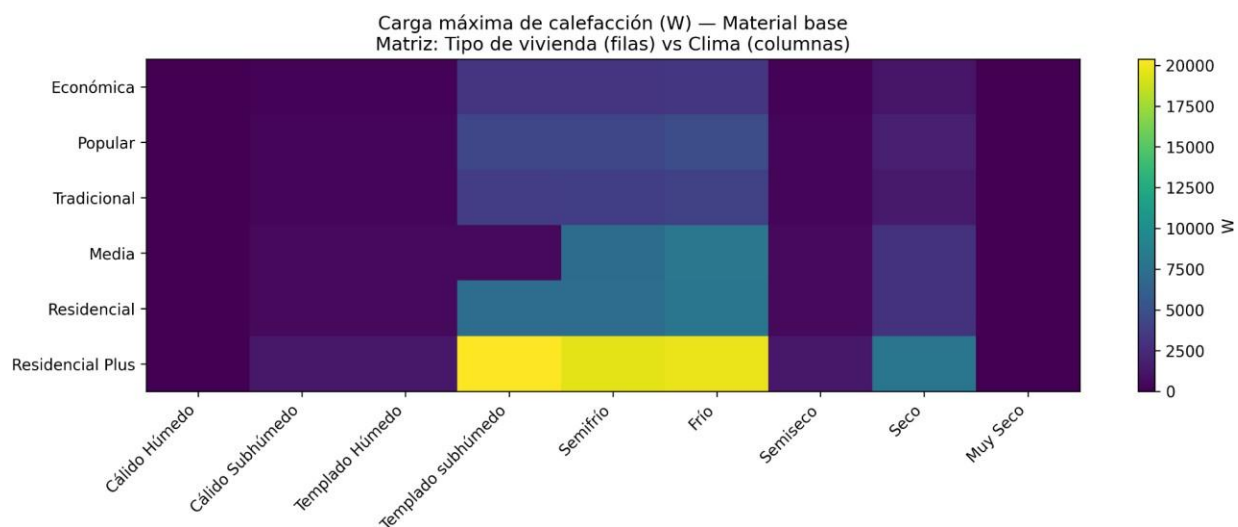


Figura 46. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con material base.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de Calefacción (cemento portland).

El análisis de la carga máxima de calefacción utilizando cemento Portland muestra que, aunque existe una ligera reducción respecto al material base, este material continúa presentando un desempeño térmico limitado, especialmente en climas fríos y semifríos. Las mayores demandas energéticas se registran en viviendas de mayor superficie, como la tipología residencial plus, evidenciando que el incremento del volumen construido amplifica las pérdidas térmicas cuando no se cuenta con una envolvente eficiente (figura 47).

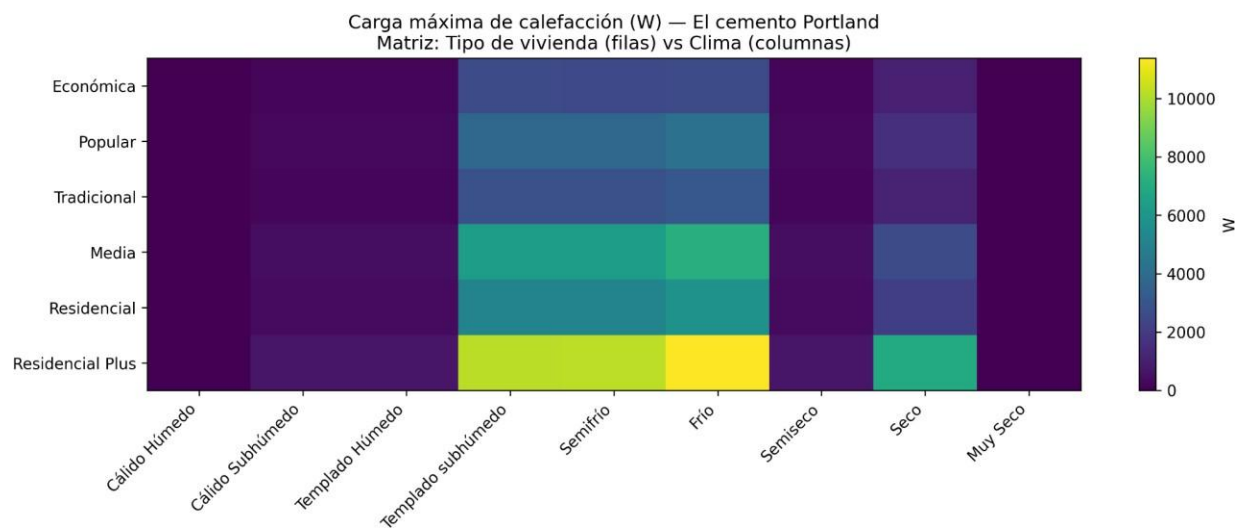


Figura 47. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con cemento portland.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de Calefacción (concreto reciclado).

El concreto reciclado presenta mejoras moderadas en calefacción, particularmente en climas templados y fríos, aunque su desempeño depende significativamente de la tipología de vivienda y no iguala el comportamiento de materiales con mayor capacidad aislante (figura 48).

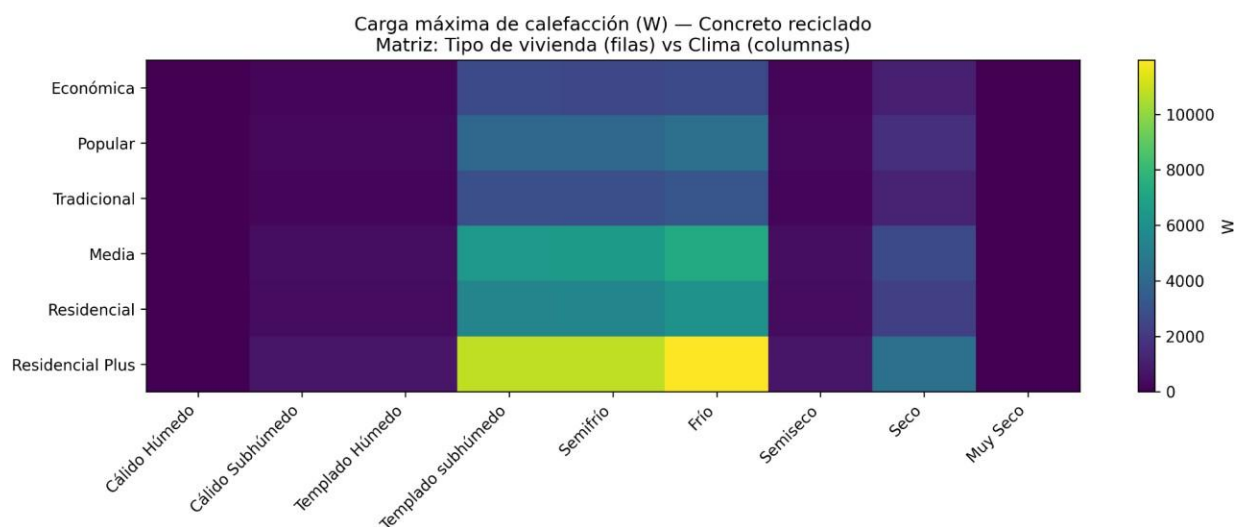


Figura 48. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con concreto reciclado.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de Calefacción (Madera recuperada).

La carga máxima de calefacción para la madera recuperada evidencia un desempeño térmico significativamente superior en comparación con los materiales convencionales evaluados. En climas cálidos, la demanda de calefacción es prácticamente nula; sin embargo, en climas templados y fríos se observa una reducción notable en las cargas térmicas respecto al cemento Portland y al concreto reciclado (figura 49).

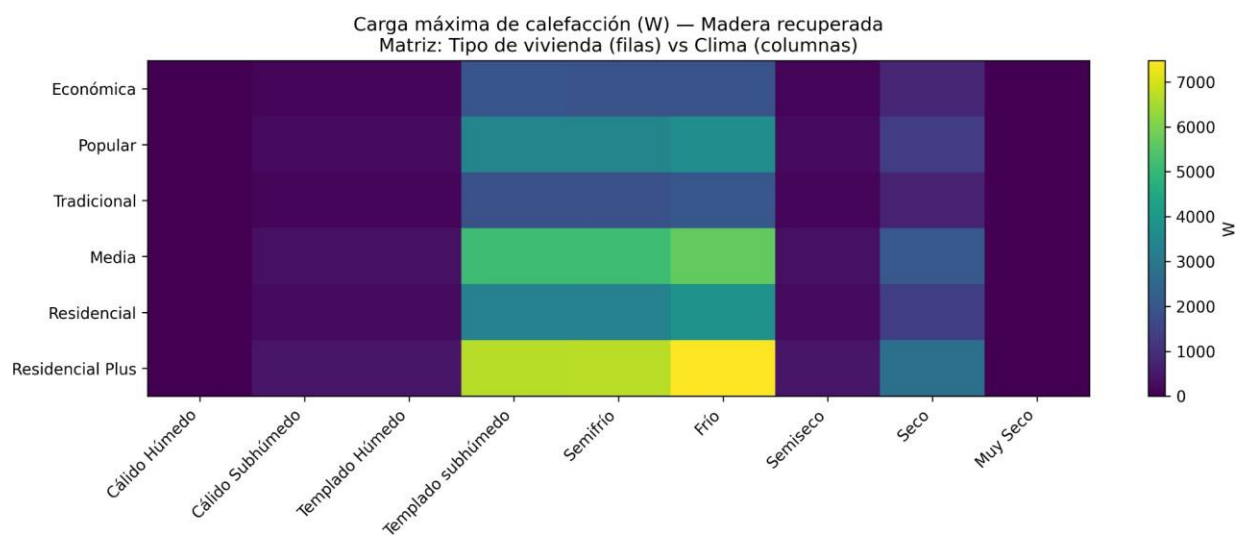


Figura 49. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con madera recuperada.

Mapa de calor (heatmap) de la carga máxima de Calefacción (Ecopanel).

La carga máxima de calefacción para el ecopanel evidencia el mejor desempeño térmico entre todos los materiales evaluados. En climas cálidos, la demanda de calefacción es prácticamente nula; sin embargo, en climas templados y fríos, el ecopanel presenta reducciones significativas en comparación con materiales convencionales y reciclados. Las cargas térmicas se mantienen consistentemente más bajas incluso en viviendas de mayor superficie, lo que indica una alta eficiencia en el control de pérdidas de calor a través de la envolvente (figura 50).

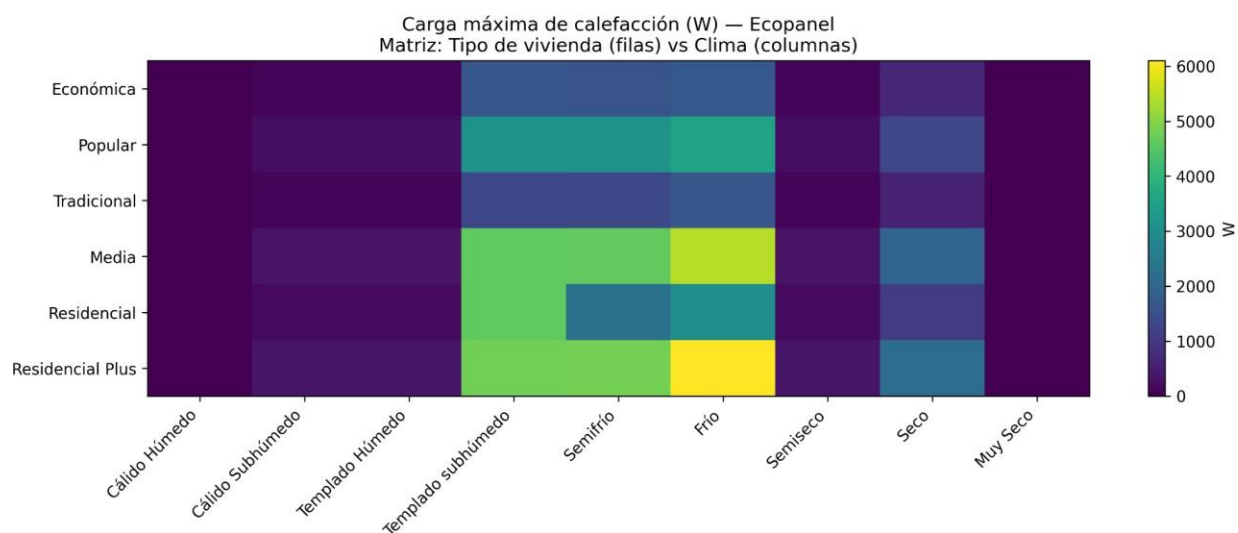


Figura 50. Carga máxima de refrigeración para viviendas construidas con ecopanel.

Tabla 4. Reducción real de la carga máxima de calefacción por material.

Material	Reducción (%)	Desempeño térmico	Observaciones técnicas
Material base	0.00%	Deficiente	Referencia de comparación
Cemento Portland	12.00%	Bajo	Ligera mejora respecto al material base, pero con alta inercia térmica y pérdidas significativas en climas fríos
Concreto reciclado	20.00%	Medio	Mejora moderada debido a su porosidad y menor conductividad térmica frente al concreto convencional
Madera recuperada	32.00%	Alto	Buen comportamiento como aislante natural, reduce pérdidas térmicas de forma consistente en climas templados y fríos
Ecopanel	45.00%	Muy alto	Mejor desempeño global; alta capacidad aislante que minimiza la transferencia térmica en todos los climas con demanda de calefacción

Costos 2026 (MXN) y estimación de costo por m² de envolvente.

Fecha de consulta: 29/01/2026 (precios en línea; sujetos a variación por ciudad, inventario y promociones).

Supuestos de cálculo (para homogeneizar comparaciones)

- Los costos por m² corresponden únicamente a la capa principal de la envolvente (sin incluir mano de obra, transporte, desperdicio, fijaciones, aplanados, pintura, impermeabilizante, estructura secundaria ni instalaciones).
- Para muros de concreto (convencional y con agregado reciclado) se calcula un espesor de 0.10 m (y se reporta adicionalmente 0.15 m como sensibilidad). Volumen por m²: $V = \text{espesor} \times 1 \text{ m}^2$.
- Concreto hecho en obra (referencia a partir de precios Home Depot): contenido típico de cemento 350 kg/m³ (~7 bultos de 50 kg) y volumen combinado de arena + grava 1.3 m³ por m³ de concreto (simplificación para estimación).
- Para el panel ecológicos econfort: la ficha técnica reporta dimensiones 1.22×2.44 m y espesores en pulgadas (2", 3", 4", 6", 8"). Se usa el precio de un panel comercial comparable (Panel W) para estimar costo por m² del sistema panelizado, por no encontrarse precio público en la ficha técnica.
- Para madera: se usa una tabla de pino de 240 cm (ancho 9.2 cm) y se calcula costo por m² por cobertura geométrica (sin considerar traslapes, mermas, bastidor, selladores o barnices).

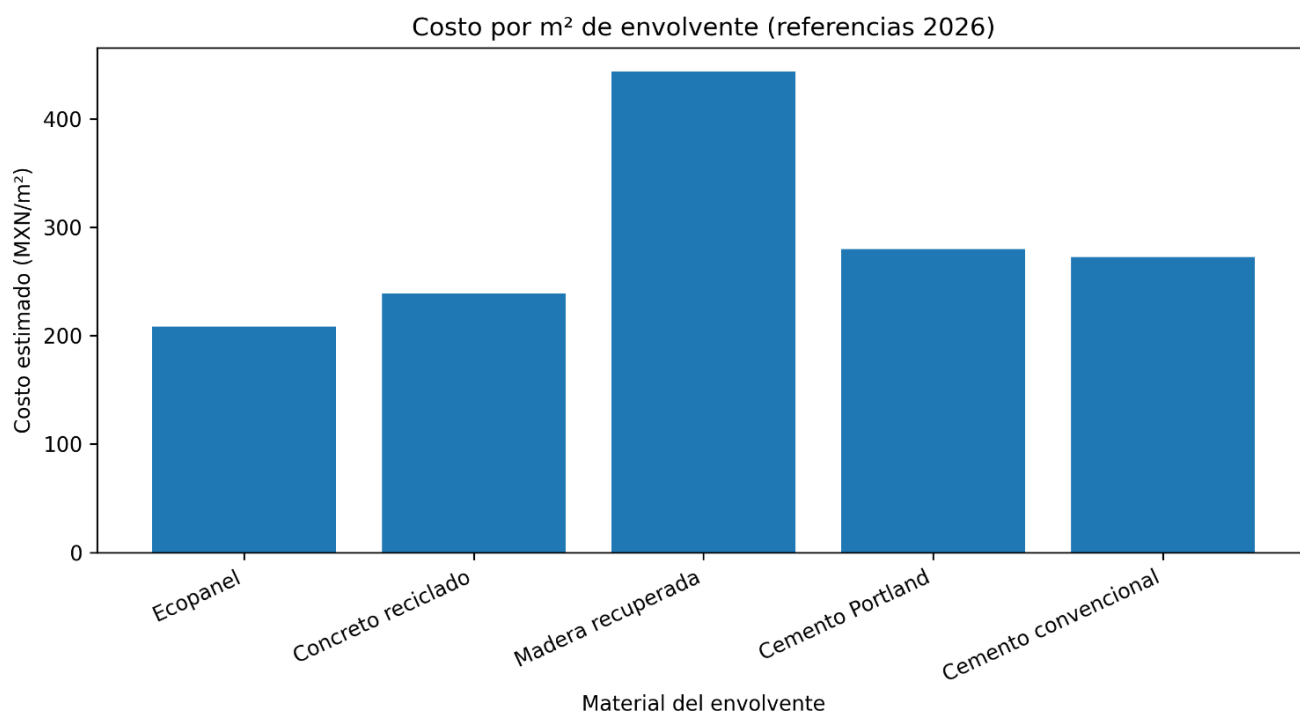


Figura 51. Comparación de costos estimados por metro cuadrado de envoltante para los cinco materiales analizados.

Se observa que los sistemas realizados en ecopanel presentan el menor costo por unidad de área, lo que se asocia a su carácter industrializado y a la optimización del material por superficie cubierta. El concreto con agregado reciclado presenta un costo intermedio, competitivo frente al concreto convencional y al cemento Portland, lo que evidencia su viabilidad económica como alternativa sostenible.

Por otro lado, la madera recuperada, considerada en formato de tablas, presenta el mayor costo por metro cuadrado, lo cual se explica por su baja cobertura geométrica y por la necesidad de elementos complementarios para su correcta integración como sistema de envoltante. En conjunto, estos resultados indican que los materiales sostenibles no necesariamente implican mayores costos iniciales, particularmente cuando se analizan por unidad de superficie efectiva.

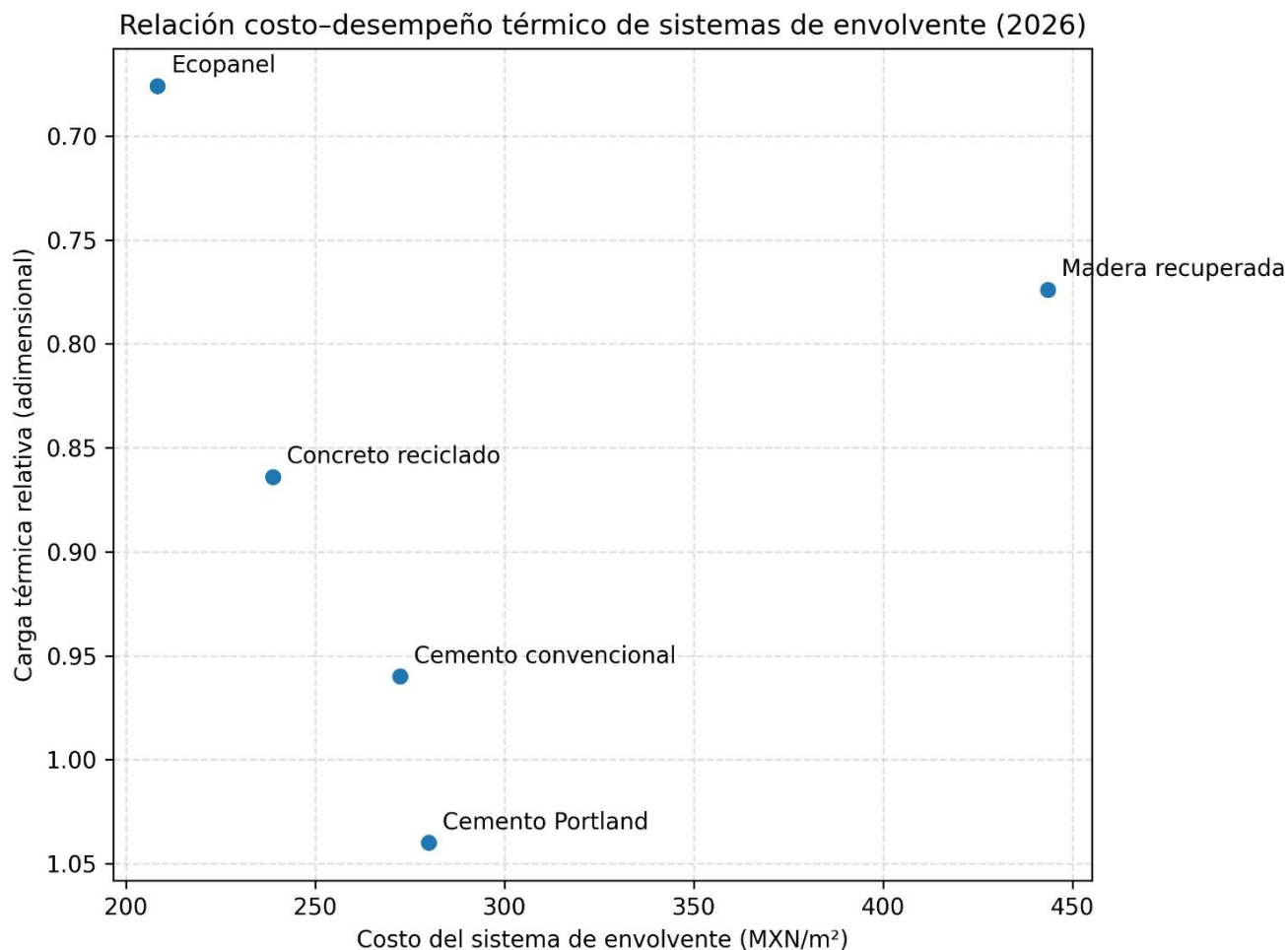


Figura 52. Relación entre el costo estimado por metro cuadrado de envolvente y la carga térmica relativa de cinco materiales constructivos empleados en vivienda modular: madera recuperada, concreto reciclado, Ecopanel, cemento Portland y cemento convencional.

La carga térmica relativa se normaliza a partir de los resultados de simulación energética, donde valores menores indican mejor desempeño térmico. Elaboración propia con base en simulaciones realizadas en CYPETHERM LOADS y precios de referencia de mercado al año 2026.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

5.1 Conclusiones generales.

El presente trabajo de investigación permitió desarrollar y validar una metodología integral para el diseño y evaluación térmica de viviendas modulares sostenibles adaptadas a comunidades rurales de México, incorporando criterios de selección de materiales ecológicos, análisis climático regional y herramientas de simulación energética bajo metodología BIM.

Los resultados obtenidos mediante simulación computacional en CYPETHERM LOADS demuestran que la selección del material constructivo influye de manera directa y significativa en la demanda energética de las viviendas, particularmente en climas extremos. Se confirma la hipótesis central del estudio: la incorporación de materiales con mayor resistencia térmica reduce las cargas de refrigeración y calefacción en comparación con sistemas convencionales.

5.2 Conclusiones técnicas del análisis térmico multiclima.

Del análisis comparativo de los nueve climas evaluados se concluye que el ecopanel presentó el mejor desempeño térmico global, registrando las menores cargas promedio tanto en refrigeración como en calefacción. La madera recuperada y el concreto reciclado mostraron un comportamiento intermedio, superior al concreto convencional y al cemento Portland, los cuales registraron consistentemente las mayores cargas térmicas.

En climas cálidos, la reducción en cargas de refrigeración fue el principal indicador de mejora energética; en climas fríos y semifríos, la disminución en cargas de calefacción evidenció el impacto del aislamiento térmico; mientras que, en climas secos y muy secos, los materiales con menor conductividad térmica lograron estabilizar mejor la temperatura interior ante condiciones de alta amplitud térmica.

5.3 Validación metodológica (BIM y simulación energética).

La integración de IFC Builder para el modelado arquitectónico y CYPETHERM LOADS para la simulación térmica bajo metodología BIM permitió estandarizar tipologías, evaluar múltiples escenarios climáticos con consistencia paramétrica y generar información cuantitativa objetiva para la toma de decisiones. La metodología demostró ser viable y replicable en el contexto de vivienda social rural.

5.4 Implicaciones para comunidades rurales de México.

La implementación de ecomateriales reduce la demanda energética anual, mejora el confort térmico interior y disminuye la dependencia de sistemas activos de climatización. Asimismo, la modularidad constructiva favorece la reducción de tiempos de ejecución, la optimización de recursos y la adaptabilidad a distintos contextos climáticos del país.

5.5 Aporte científico y tecnológico.

El principal aporte de esta investigación radica en la propuesta de una metodología replicable de evaluación multiclima-material, la integración de herramientas BIM en vivienda rural y la generación de evidencia cuantitativa sobre el impacto térmico de materiales ecológicos en México. El estudio contribuye al campo de la ingeniería ambiental y tecnologías sostenibles al vincular eficiencia energética, sostenibilidad y diseño modular.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



5.6 Limitaciones

"El presente proyecto de investigación enfrenta limitaciones relacionadas con la aceptación cultural de las comunidades, la adaptación a reglamentos de construcción locales y federales, la adaptación a las características naturales y del entorno construido del sitio de emplazamiento, y los requerimientos necesarios para su resistencia a sismos y desastres naturales".

ABREVIATURAS.

ASHRAE Sociedad Estadounidense de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

COP21 Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2021

CONAVI Comisión Nacional de Vivienda.

DOE Departamento de Energía de los Estados Unidos

GAHE Intercambiador de calor tierra aire

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

NZEB Edificio energía cero

UE Unión Europea

UME Unidades Modulares Ecológicas

Referencias consultadas (para la tabla de costos).

The Home Depot México (Pro). Cemento Portland gris de 50 kg. Disponible en: <https://pro.homedepot.com.mx>

The Home Depot México. Tabla de pino para cimbra 1×4×8. Disponible en: <https://www.homedepot.com.mx>

TuCompa. Concreto premezclado y concreto ecológico con agregado reciclado (precios por m³). Disponible en: <https://tucompa.com>

Plaforama. Panel W para muro estructural (utilizado como referencia de costo para sistemas panelizados tipo Ecopanel). Disponible en: <https://plaforama.com>

Econfort – Muro Ecológico. Ficha técnica del panel ecológico térmico. Disponible en: <https://www.muroecologico.com.mx>

CYPE Ingenieros. CYPETHERM LOADS: Herramienta de simulación energética para edificios. Disponible en: <https://www.cype.com>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



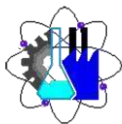
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ASHRAE, A. S. o. H. a. A. C. E., 2023. *Energy efficient HVAC system design*. Austin, Tx., s.n.
- Basterra, M. & Hermana, R., 2020. Economía circular y cambio climático.
- CEPAL, 2021. Economía Circular En América Latina Y El Caribe. *Naciones Unidas*, p. 107.
- Cerdá, E. & Khalilova, A., 2016. Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), pp. 11 - 20.
- Chacón, S., 2022. *Energía Neta Cero en Edificios*. s.l.:WILLACHIKUY.
- Chavarro, D., Vélez, M., Tovar, G. & Montenegro, 2017. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia y el aporte de la ciencia, la tecnología y la innovación. *Documento de trabajo*, p. 30.
- Consejo CONEVAL, N. d. E. d. I. P. d. D. S., 2018. *Principales retos en el ejercicio del derecho a la vivienda digna y decorosa*. Ciudad de México: CONEVAL.
- Corner , D., Fillinger, J. & Kwok, A., 2017. *Passive House Details: Solutions for High-Performance Design*. Reino Unido: Taylor & Francis.
- DOE, D. d. E., 2021. s.f..
- Gallardo, V., 2019. *Recomendación de diseño para edificios de oficina para mínimo consumo de energía en zonas del Centro Sur de Chile*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile .
- Garzón, J., 2023. Optimización del diseño de espacios de vida temporales consumo cero.
- Giraldo-Castañeda, W., Czajkowski, J. & Gómez, A., 2021. Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura*, 23(1), pp. 115-124.
- Giudicianni, C. y otros, 2020. Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. *Journal of Cleaner Production*, Issue 252, 119745.
- INEGI, 2020. *Encuesta nacional de vivienda (ENVI), 2020*. Ciudad de México: s.n.
- Ipur, 2023. Edificios de energía cero, la definición oficial. *Blog de Edificación y Energía*.
- Jaimes, G., 2016. *Evaluación del ciclo de vida de sistemas de energías renovables aplicados a edificios próximos a cero energía*. Universidad de Valladolid, s.n.
- Labastid, D., Bolobosky, M., Mogollón, L. & James, A., 2018. Implementación de un Intercambiador de Calor en Techos de Zinc. *KnE Engineering*, pp. 747-757.

- Luengo Arias, M., 2020. Nomadismo Arquitectónico: ¿Legado prehistórico o paradigma del mañana?.
- MacArthur, F. E., 2017. Economía circular.
- Nam, S., Yoon, J., Kim, K. & Choi, B., 2020. Optimization of prefabricated components in housing modular construction. *Sustainability*, 12(24), p. 10269.
- ONU-Habitat, 2018. *Programas de Infonavit y ODS. México: Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos*. s.l.:s.n.
- Pearce, D. & Atkinson, G., 2017. Capital theory and the measurement of sustainable development: an indicator of “weak” sustainability.. *The economics of sustainability*, pp. 227 - 232.
- Rizzi, M., 2018. *Vivienda mínima. El contenedor marítimo como unidad espacial básica para la configuración de espacios transformables*.. s.l.:s.n.
- Rodríguez Huitrado, B., 2021. Indicador multidimensional de pobreza energética integrando confort térmico de verano en ciudades con clima cálido seco.
- Schröder, P. y otros, 2020. The circular economy. *Latin America and the Caribbean. The Royal Institute of International Affairs*.
- Shahi, A., 2012. *Prefabricated Housing and LEED*. Kanada: Tez, Ryerson Üniversitesi.
- Stahel, W., 2020. History of the circular economy. The historic development of circularity and the circular economy. *The Circular Economy in the European Union: An Interim Review*, pp. 7-19.
- Torres-Parra, C., Saldeño-Madero, Y., Castiblanco-Prieto, J. & Villegas-Flores, N., 2023. *La vivienda modular y progresiva como alternativa de cobijo y mejoramiento urbanístico en asentamientos barriales informales*.. Bogotá, Colombia: s.n.
- UNEP, 2022. Economía circular en América Latina y el Caribe. *Circular Economy Coalition*, p. 58.
- Wadel Raina, G., 2009. *La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: la construcción modular ligera aplicada a la vivienda*. s.l.:Universitat Politècnica de Catalunya.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

PROGRAMAS EDUCATIVOS DE CALIDAD RECONOCIDOS POR CIEES, CACEI Y SECIHTI
SGI Certificada en las Normas ISO 9001:2015, ISO 21001:2018 y NMX-R-025-SCFI-2015

FORMATO T-2

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 27 de abril del 2026.

Dr. Moisés Montiel González
Dra. Pamela Estrellita Zúñiga Bello
Dra. María Magdalena Morales Guillén
Dra. Areli Rizo Aguilar
Dra. Gabriela Hernández Luna

P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta I.I.S. RAÚL OBED GONZÁLEZ AMARO titulado: **“Metodología de fabricación de viviendas modulares sostenibles para comunidades rurales de México”**, realizada bajo la dirección del Dr. Moisés Montiel González y la Co-dirección de la Dra. Pamela Estrellita Zúñiga Bello, del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Moisés Montiel González	APROBADO	
Dra. Pamela Estrellita Zúñiga Bello	APROBADO	
Dra. María Magdalena Morales Guillén	APROBADO	
Dra. Areli Rizo Aguilar	APROBADO	
Dra. Gabriela Hernández Luna	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2026-04-28 09:17:51 | FIRMANTE

SMx/QguNyXm9hbw9JowjgfkENgX5S1M29eq1R2g1M2UT0OQ6CurmejQzNYfAownboUbEjP9VNxocDGjsgQ9kEn++Ank54JcASAVA0QjKhAvQm8+k2/7dcNp+XnMRsSjNDi
QxL1qu/TdQkD0wyULeVH81y6fHmaKhjwfRhEcrV77LVmpBvsiXkFfSdZhp8+BLNOt40AqV6022v0D8D2xSHuXjhgtrU+DMdC1Vvak3H02oGnO3F+9hHCprmtGmHMgua263Z
2+hbYhFZ+qJcPYnq/cj7mfSsYRk+KynjJI3FadjaNqN8yjs09PnbfrPII8ML7O3OsuiYKLfwA9w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



9pdYHqjJD

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/1J8QM5EKNKYEpBNOEjd9epK0BgHN2xXK>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

PAMELA ESTRELLITA ZUÑIGA BELLO | Fecha:2026-04-28 14:38:26 | FIRMANTE

Os3Dm51HTRoZyBqdCaL5kIGOMzdpAroFeNyQdEP0qMZ0WkKKKX6O29nFk3qzi+D5WK6a72pACo5zjn1Arm4K30VSGbxayxZ2y64dQYppMofqqJ+pAvAv7T+6HsL+s8knP2rfLfi6rKTIY7qk+y/339EhXdgURvh+WvbUWnxgr+ZJqjN0ZLmKmyrv4868QoCZSDOPgeYwh9vThEYdGoM3GptscVxf3w9IKkyhM3wcvMDEFbBviQEOwF44E2wpxZvbo3eJQoMFXZr+Fd8XnOyX9QXCwiSufBV6/6K1k8KvOUDy75pUhyA5CqoWuXhAhSnhJy+C/9va3UZ7mmG+/rw==

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2026-04-28 15:16:17 | FIRMANTE

OYZkDLZ8wtPZ9t5M/2C+Go0yZ99BoKgGxpbeqQwFJXHyaxlfHh2dtY3KCSG0s1Pzm19U8vVPQSAiwkIFcY+unBcrR1uavz0fUrSK8CFKajeFKbkkI5KJ5wiBAGwkso2GSUY4sPZmRIR1VbFrEK+PrsGgsUzJN2Ri6pomhQRBYgWbPDqkjgXlykoPLBHFbAsMpFI18Te+jry7qulqa3hplFhQMEQTKLatmFf8BiKMMt/0aNDR3pr04p+GFGvqWzyEBB8s9y6slbT8RtjdVABFSjHwboYnJ/Ozv3Mc841abYSWI7BLi7FF7pm0VZTmz3v4si2/Ona3PPQVLJcNWpFLg==

MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN | Fecha:2026-04-29 10:26:10 | FIRMANTE

KmptkK5aQnJ7QQz0URQGcS1y9CGTLI8Xh5L2BX2aw4SGM0uT8yD3WOVj9ZUBoZcv9ApNKdQLqaX8NBIOHZZWZNM/hXBKPQDUhQIK+0grhzc84sjosvDE1G+dx7cyCnHpSXIDR0Zh97o4CoCD+M7KX+tkalfYp5J8K2AMfUhfU9FD1RzAlmBi/deq2/5X0DaxNVL7K/vboynFKzMkLR5r/laKXVaVG6KfpE2R0A/2tR4RiTULgxCBLLQ/h1Llv5ZABThx/Y7dM3XyYwP2ZqRz282Q3epEPf+ht8+R/vMJ9BYJp5iM54uFOqNm+Ve9W3CxYteJV4mCg4jQieWkEwAwQ==

GABRIELA HERNANDEZ LUNA | Fecha:2026-04-29 13:30:57 | FIRMANTE

za9WaG58H/qKtjyc1qyXdpHVFgV52Ad2Hm4BXDPx5C4sEo5loXtQXNtOtknmPneFU2ogsW3LtkFIE/FHZ/lozgVbgY1GhBdbH3Cj0oFQD1Pn+Nu8/uMU08c+OZ9XknBxf6XzSfr4hv0oK/ZEnBmpj3uzSS95r+8V5Bz68OYslm4cDgp0YQEZFvJmAYv3IXPhE9IkQJZBphrgmAG07zt95ZDFNm/FfXn6bw+vNOzH57kyxuCDcke+jJ6DwCjeP3ucNDnZ4BiNg5YTY4y91vsJ5erW9DVKo8saWHWWYw+/Zk717gWvOT+KMJrtBjeAweaqCvb4ODPXvGIT4e7gXNI7Q==

ARELI RIZO AGUILAR | Fecha:2026-05-04 23:38:16 | FIRMANTE

lVRvdFWwpWenxiQ0P26+/d6PKRkQBQMyUnTCnTXu7PVn8tdx4dhphV92tH315UIBblX8pl4ROH3xIMnGZxd80goGKL01cQtJrfJ1mr40biMNw91U75HW3WM1aCKzDgmuQEoHoU6zH0P0CCE/jZ/ldbo7jDvl2wQy7T9D125rHgmB17CEhYqM2roaXlutaGA0sRzaggLZKO/mCj5zhjPmFav5Xu2MVwgWT6LpQuYiTh0M7acwHSTjz6SZHUU8GXJg3G6xjf9kONQgxC3ODkXU05KikDlyUp70D6tLxNqWtmUeDylXYYkocYmEguA3ExRSKtLEZaaUu/nwOAAWfx2OQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



lbMu8eQUZ

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/MyWWLH2Eo0ufhQz5dEvfiQOb2nvETBF5>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029