

Desempeño energético y costos operacionales de viviendas modulares reutilizables de emergencia en distintas zonas climáticas de Chile

Paolo Macaya-Vitali¹; Aner Martínez-Soto¹; Carlos Rojas-Herrera¹; Rodrigo Herrera-Valencia²

¹Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile

²Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso Chile

Resumen – Las viviendas de emergencia cumplen un rol clave en los procesos de respuesta y recuperación posteriores a desastres naturales. Sin embargo, muchas de las soluciones habitacionales utilizadas actualmente presentan limitaciones en términos de confort térmico, eficiencia energética y costos operacionales. Este estudio evalúa el desempeño energético y los costos operacionales de un modelo de vivienda de emergencia modular reutilizable desarrollado para el contexto chileno, comparándolo con tres soluciones habitacionales disponibles en el mercado con superficies cercanas a 34 m². El análisis consideró las propiedades térmicas de la envolvente, la demanda energética anual de calefacción y refrigeración y los costos operacionales asociados en nueve zonas climáticas de Chile, utilizando la herramienta de Calificación Energética de Viviendas (CEV). Los resultados muestran que el modelo modular reutilizable reduce la demanda energética de calefacción en más de 65 % en las zonas climáticas más frías. Asimismo, se identificó una zona de transición climática entre las zonas C y D, a partir de la cual el mayor nivel de aislamiento térmico comienza a dominar el balance energético anual. Desde una perspectiva económica, el modelo propuesto reduce los costos operacionales de climatización desde aproximadamente 6.47 millones de CLP/año en las soluciones menos eficientes hasta 2.25 millones de CLP/año en la zona climática más fría. Estos resultados evidencian el potencial de incorporar criterios de eficiencia energética en el diseño de viviendas de emergencia incluso bajo restricciones constructivas y presupuestarias propias de contextos post-desastre, y sugieren que las viviendas modulares reutilizables constituyen una alternativa prometedora para mejorar la sostenibilidad de las estrategias de reconstrucción habitacional.

Palabras clave – Vivienda de emergencia, Construcción modular, Eficiencia energética, Costos operacionales, Zonas climáticas.

I. INTRODUCCIÓN

Chile es uno de los países con mayor exposición a desastres naturales a nivel mundial debido a su localización en el cinturón de fuego del Pacífico, su extensa geografía y la diversidad de condiciones climáticas presentes en su territorio [1]. En las últimas décadas, terremotos, incendios forestales, inundaciones y aluviones han generado importantes pérdidas humanas, económicas y sociales [2]. Por ejemplo, el terremoto y tsunami de 2010 provocó daños en más de 220.000 viviendas, mientras que eventos recientes asociados a incendios forestales e inundaciones han afectado a decenas de miles de hogares en distintas regiones del país [3,4]. En este

contexto, la provisión de soluciones habitacionales de emergencia constituye una estrategia clave para responder a las necesidades inmediatas de las familias afectadas durante las primeras etapas de recuperación.

Las viviendas de emergencia tienen como objetivo proporcionar refugio temporal mientras se desarrollan los procesos de reconstrucción de viviendas permanentes [5]. Sin embargo, estos procesos suelen extenderse por largos períodos, desde varios meses hasta más de cinco años, dependiendo de la magnitud del desastre, las capacidades institucionales y la disponibilidad de recursos [6]. Como consecuencia, muchas familias permanecen en estas viviendas durante más tiempo del inicialmente previsto, lo que evidencia la importancia de garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad y confort.

A pesar de su relevancia en los procesos de recuperación post desastre, diversas investigaciones han señalado que las soluciones habitacionales temporales actualmente implementadas presentan limitaciones importantes [7]. Entre los problemas más frecuentes se encuentran bajos niveles de confort térmico, escasa eficiencia energética, limitada durabilidad de los sistemas constructivos y dificultades asociadas al transporte, montaje y disposición final de las estructuras [8–10]. Estas limitaciones afectan directamente el bienestar de los ocupantes y pueden generar costos adicionales asociados al mantenimiento, reemplazo o disposición final de estas soluciones.

El desempeño energético de las viviendas constituye un aspecto particularmente relevante en este contexto. A nivel global, el sector residencial representa aproximadamente entre el 20% y el 30% del consumo energético final en numerosos países [11], mientras que en Chile concentra cerca de un cuarto del consumo energético nacional, siendo la calefacción uno de los principales usos finales de energía en los hogares [12]. En zonas de clima frío, la falta de aislamiento térmico adecuado puede generar elevadas demandas de calefacción, aumentando el gasto energético de las familias y las emisiones asociadas al uso de energía [13].

Este desafío se vuelve especialmente relevante en Chile debido a su diversidad climática. El país se extiende por más de 4.000 km en sentido latitudinal, abarcando desde climas desérticos en el norte hasta climas templados lluviosos y fríos en el sur [14]. Esta diversidad ha llevado al establecimiento de

nueve zonas climáticas para el diseño de edificaciones en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones [15]. Sin embargo, muchas soluciones de vivienda de emergencia implementadas tras desastres se diseñan con criterios estandarizados que no consideran adecuadamente estas diferencias climáticas [16].

En respuesta a estas limitaciones, diversas investigaciones han explorado el uso de sistemas constructivos industrializados y soluciones modulares para mejorar el desempeño de las viviendas de emergencia. Estos enfoques permiten optimizar los procesos de fabricación y montaje, mejorar el control de calidad de los elementos constructivos y facilitar el transporte e instalación de las unidades habitacionales [12]. Asimismo, la construcción modular puede favorecer la reutilización de componentes estructurales en distintos escenarios de emergencia, contribuyendo a la aplicación de principios de economía circular en el sector de la construcción [10,17].

A nivel internacional se han desarrollado distintas propuestas de viviendas de emergencia modulares, incluyendo soluciones basadas en contenedores reutilizados y sistemas modulares progresivos [8], viviendas móviles con autosuficiencia eléctrica basadas en sistemas prefabricados [18], y soluciones reutilizables desarrolladas mediante paneles de madera y materiales compuestos [10]. Estas iniciativas evidencian el potencial de la construcción modular para mejorar la adaptabilidad y sostenibilidad de las soluciones habitacionales temporales.

En el contexto chileno, diversos estudios han abordado el diseño de viviendas de emergencia incorporando mejoras funcionales y constructivas, incluyendo sistemas modulares de rápido montaje [19], análisis sobre la configuración urbana de asentamientos temporales [20] y el uso de paneles estructurales aislados para mejorar el desempeño térmico de estas soluciones [21]. No obstante, aún existe una escasez de estudios que evalúen comparativamente el desempeño energético de distintas soluciones de vivienda de emergencia considerando las condiciones climáticas del país y sus implicancias en términos de consumo energético y costos operacionales. En este contexto, la principal contribución de esta investigación radica en evaluar comparativamente el desempeño energético y económico de una vivienda de emergencia modular reutilizable frente a soluciones habitacionales disponibles en el mercado chileno, considerando su comportamiento en distintas zonas climáticas del país.

En este contexto, la presente investigación evalúa el desempeño energético y los costos operacionales asociados al consumo de energía de una vivienda de emergencia modular reutilizable desarrollada para el contexto chileno. El modelo propuesto, desarrollado en colaboración con la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) de la región de La Araucanía, se compara con tres modelos de vivienda de emergencia actualmente disponibles en el mercado chileno con

superficies similares. Para ello, se realizaron simulaciones energéticas mediante la herramienta de la Calificación Energética de Viviendas (CEV) considerando las nueve zonas climáticas definidas en la normativa chilena. A partir de la demanda energética obtenida en las simulaciones, se estimaron los costos operacionales asociados al consumo eléctrico necesario para satisfacer los requerimientos de calefacción y refrigeración de cada modelo habitacional, permitiendo comparar su desempeño energético y económico bajo las distintas condiciones climáticas presentes en el territorio chileno.

II. MÉTODOS

La metodología de investigación se desarrolló en tres etapas principales: (A) selección y caracterización técnica de viviendas de emergencia de referencia presentes en el mercado chileno; (B) simulación energética de los modelos habitacionales; y (C) estimación de los costos operacionales asociados al consumo energético. De manera complementaria, se realizó un análisis de sensibilidad (D) con el fin de evaluar la influencia de variaciones en las tarifas eléctricas sobre los costos operacionales estimados.

El flujo general del proceso metodológico se presenta en la Fig. 1, donde se sintetizan las etapas principales del estudio, desde la identificación y caracterización de los modelos habitacionales de referencia hasta la evaluación comparativa del desempeño energético y los costos operacionales bajo distintas condiciones climáticas.



Fig. 1 Esquema metodológico del estudio.

Posteriormente, cada una de las etapas del proceso metodológico se describe en detalle en las siguientes subsecciones.

2.1 Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a una vivienda de emergencia modular reutilizable (modelo base) compuesta por dos módulos desmontables que, una vez ensamblados, conforman una superficie total de 34.74 (m²). Este prototipo fue desarrollado en colaboración con la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) de la región de La Araucanía como una alternativa orientada a mejorar el desempeño energético y la sostenibilidad de las soluciones habitacionales temporales utilizadas en contextos de emergencia.

La Fig. 2 muestra el esquema general del modelo modular, mientras que la Fig. 3 presenta la configuración de los dos módulos que conforman la vivienda.

La distribución interior del prototipo se muestra en la Fig. 4, donde el módulo 1 (M1) contempla la cocina, el pasillo de conexión entre habitaciones, el baño y el dormitorio matrimonial, mientras que, el módulo 2 (M2) considera la sala de estar, comedor, y un dormitorio secundario, permitiendo alojar a un grupo familiar de tamaño reducido en condiciones de habitabilidad básicas.



Fig. 2 Modelo base de la vivienda modular.

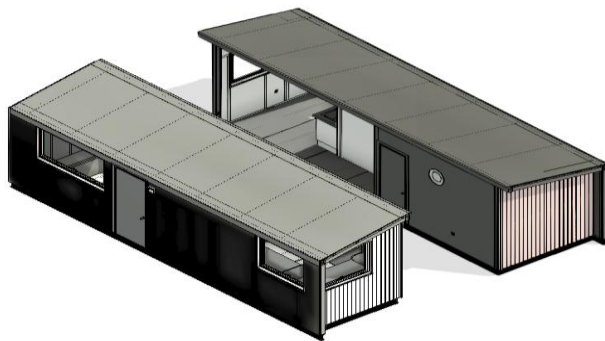


Fig. 3 Configuración de los módulos que conforman la vivienda.

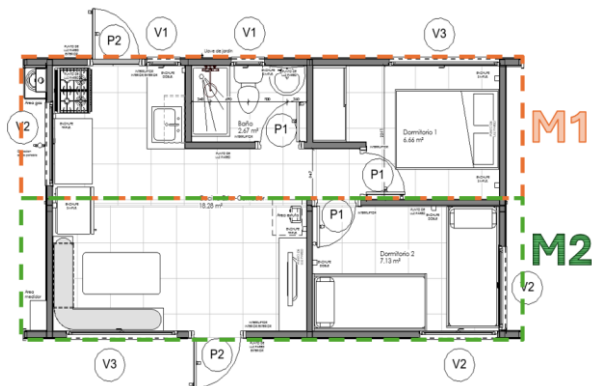


Fig. 4 Planta modelo base de la vivienda.

El sistema constructivo del modelo combina una estructura de contornos metálica, con un reticulado interior de madera, configurando un sistema modular desmontable que permite su transporte, montaje y eventual reutilización en distintos escenarios de emergencia. La envolvente térmica está compuesta por un piso ventilado, muros exteriores y una cubierta liviana, todos ellos incorporando capas de aislación térmica en su configuración constructiva.

El piso ventilado está conformado por un entramado estructural de madera con terminaciones exteriores de fibrocemento y terminaciones interiores de tableros contrachapados de 18 (mm) de espesor recubiertos con revestimiento vinílico. Los muros exteriores consideran revestimiento exterior de tablero estructural de 11.1 (mm) de espesor, sobre barrera de humedad, mientras que el interior se resuelve mediante revestimientos de terciado ranurado (madera) o fibrocemento, dependiendo del tipo de recinto y diferenciando entre zonas secas y zonas húmedas. La cubierta se compone de planchas metálicas onduladas de 0.4 (mm) en el exterior y revestimientos interiores de tableros estructurales de 11.1 (mm) en zonas secas, y placas de yeso cartón en zonas húmedas. La Fig. 5 presenta el corte escantillón del sistema constructivo del modelo base para zonas secas. En el caso de las zonas húmedas, la única modificación respecto de esta configuración corresponde al cambio del material de revestimiento interior anteriormente señalado.

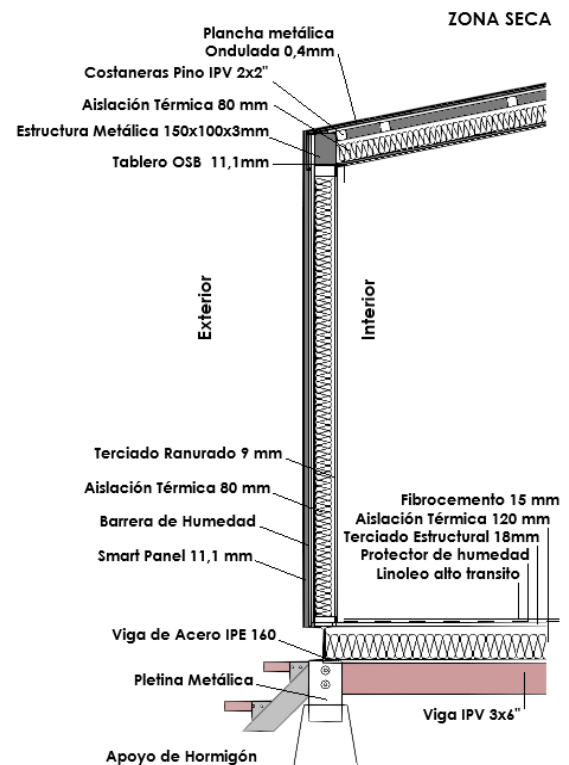


Fig. 5 Corte escantillón de la vivienda.

Asimismo, el modelo propuesto contempla instalaciones básicas de electricidad, agua potable, alcantarillado y suministro de agua caliente sanitaria, permitiendo su operación en contextos de emergencia siempre que exista conexión a redes de servicios disponibles en el sitio de emplazamiento.

A) Caracterización de viviendas de referencia

Para realizar el análisis comparativo del desempeño energético, se identificaron viviendas de emergencia disponibles en el mercado chileno a partir del 7 de agosto de 2021, fecha asociada a la creación del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, que formaliza la posibilidad de definir estándares para viviendas de emergencia mediante resoluciones administrativas [22]. La identificación de estas soluciones se realizó mediante la revisión de antecedentes provenientes de:

- El sistema de compras públicas (ChileCompra).
- Documentación técnica proporcionada por proveedores.
- Antecedentes de programas de respuesta ante desastres.

A partir de este catastro inicial se seleccionaron tres modelos de viviendas de emergencia utilizados en el país con superficies similares a la del modelo modular propuesto.

El principal criterio de selección correspondió a la superficie construida, con el fin de garantizar la comparabilidad funcional entre las soluciones habitacionales evaluadas. Para ello se estableció un rango de tolerancia de $\pm 10\%$ respecto de la superficie de la vivienda modular base (34.74 m^2).

Los modelos seleccionados debían corresponder a viviendas de emergencia destinadas a uso habitacional familiar con configuraciones espaciales comparables (zona común, dormitorios y servicios básicos). Este criterio permitió asegurar condiciones de comparación equivalentes entre las soluciones habitacionales analizadas [23,24].

Para cada modelo se recopiló información técnica relacionada con sus características constructivas. La caracterización de los modelos consideró las siguientes variables:

- Superficie construida.
- Materialidad de los elementos de la envolvente (muros, cubierta y piso).
- Sistema estructural.
- Instalaciones disponibles.

Esta información permitió definir los parámetros constructivos necesarios para estimar la transmitancia térmica de la envolvente y simular el desempeño energético de cada modelo habitacional.

B. Simulación energética

El desempeño energético de los modelos habitacionales analizados se evaluó mediante simulaciones realizadas con la herramienta de Calificación Energética de Viviendas (CEV) desarrollada para el contexto chileno [25]. Esta herramienta estima la demanda energética anual de edificaciones

residenciales a partir de la modelación de sus características geométricas, constructivas y operacionales bajo condiciones estandarizadas de uso y archivos climáticos representativos del territorio nacional.

Las propiedades térmicas de la envolvente se definieron a partir de los valores de transmitancia térmica (U-value) de los elementos constructivos del caso de estudio, determinados según el procedimiento establecido en la norma chilena NCh853:2021, que define el método de cálculo de la resistencia térmica y transmitancia térmica de componentes constructivos [26]. Los valores de transmitancia térmica considerados para el modelo base fueron $0.55 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para muros, $0.57 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para techumbre, $0.49 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para piso, $1.7 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para puertas y $2.8 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para ventanas.

Las simulaciones se realizaron considerando las zonas climáticas definidas en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y los datos climáticos establecidos en la NCh1079:2008, que representan la diversidad climática del territorio chileno, desde zonas cálidas en el norte hasta climas fríos en el sur [14]. La selección de las ciudades representativas para cada zona climática se realizó mayormente de acuerdo con el estudio desarrollado por Martínez-Soto et al. (2021), donde, las comunas representativas de este estudio para cada zona climática fueron: Antofagasta, Copiapó, Valparaíso, Santiago, Concepción, Temuco, Osorno, Taltal y Coyhaique [27].

Las condiciones operacionales de uso de la vivienda se definieron de acuerdo con los parámetros estandarizados establecidos por la metodología de la Calificación Energética de Viviendas, con el fin de garantizar la comparabilidad entre los distintos modelos evaluados. Estas condiciones incluyen perfiles de ocupación (tres personas para el caso de estudio), cargas internas y patrones de uso energético [28]. La adopción de estos supuestos estandarizados permitió aislar el efecto de las características constructivas y térmicas de cada modelo habitacional, evitando sesgos derivados de condiciones variables de uso y reforzando tanto la comparabilidad entre soluciones como la replicabilidad del análisis. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como una comparación bajo condiciones operacionales homogéneas y no como una predicción del comportamiento de hogares específicos.

En el modelo de simulación se consideró una temperatura interior de confort de 19°C , mientras que los parámetros de ventilación e infiltración se establecieron en 2.53 (L/s) y $5 \text{ (ACH}_{50})$ respectivamente, de acuerdo con los valores de referencia utilizados en la metodología de evaluación energética residencial en Chile [29].

C. Estimación de costos operacionales de energía

Los costos operacionales se estimaron a partir de la demanda energética anual de calefacción y refrigeración obtenida en las simulaciones, expresada en kWh/año .

Para estimar el consumo eléctrico asociado al acondicionamiento térmico de las viviendas, se asumió el uso de una bomba de calor aire-aire con un coeficiente de desempeño (CoP) igual a 3, valor representativo de equipos residenciales disponibles actualmente en el mercado [30]. En consecuencia, la energía eléctrica requerida para satisfacer la demanda térmica anual se estimó dividiendo la demanda energética obtenida en las simulaciones por el valor del CoP del sistema.

El costo unitario de la energía eléctrica se definió a partir de tarifas representativas para consumidores residenciales en Chile, expresadas en CLP/kWh, obtenidas a partir de información pública del sistema eléctrico nacional [31,32]. Con el fin de reflejar las diferencias tarifarias presentes en el país, se consideraron valores representativos asociados a las comunas utilizadas como referencia para cada zona climática evaluada.

Las tarifas eléctricas consideradas para las ciudades representativas de Antofagasta, Copiapó, Valparaíso, Santiago, Concepción, Temuco, Osorno, Taltal y Coyhaique fueron 252.7, 277.1, 293.5, 226.8, 249.8, 277.4, 269.7, 229.5 y 286.8 CLP/kWh, respectivamente.

El costo anual de operación energética se estimó mediante la siguiente expresión (ecuación 1):

$$C_{op} = \frac{E_{anual}}{CoP} \times T_{elec} \quad (1)$$

donde C_{op} corresponde al costo operacional anual expresado en CLP/año, E_{anual} a la demanda energética anual expresada en kWh/año, CoP al coeficiente de desempeño del sistema, y T_{elec} a la tarifa eléctrica residencial expresada en CLP/kWh.

D. Análisis de sensibilidad

Con el fin de evaluar la robustez de los resultados económicos obtenidos, se realizó un análisis de sensibilidad considerando variaciones en la tarifa eléctrica utilizada para el cálculo de los costos operacionales. Para ello se definieron tres escenarios de análisis:

- Escenario base: tarifa eléctrica considerada en el estudio.
- Escenario bajo: reducción del 20 % en la tarifa eléctrica.
- Escenario alto: aumento del 20 % en la tarifa eléctrica.

Este análisis permite evaluar la influencia del precio de la energía sobre los costos operacionales estimados para los distintos modelos habitacionales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A) Caracterización de viviendas de referencia

En esta sección se presentan las características constructivas de las viviendas de emergencia seleccionadas como referencia para el análisis comparativo. Los modelos corresponden a tres soluciones habitacionales disponibles en el mercado chileno con superficies similares a la vivienda (modelo) base. Las principales características de los modelos analizados se describen a continuación:

- Modelo 1 (M1): Corresponde a una vivienda modular de 34.48 m², compuesta por módulos de paneles estructurales aislados (SIP), techos prefabricados y módulos de piso con aislación térmica. La vivienda cuenta con una puerta exterior, cuatro ventanas y un módulo de baño, pero no incluye instalaciones eléctricas.
- Modelo 2 (M2): Corresponde a una vivienda modular de 33 m², construida mediante módulos de estructura de madera con aislación térmica. La vivienda cuenta con una puerta exterior y tres ventanas, y no contempla baño ni instalaciones eléctricas.
- Modelo 3 (M3): Corresponde a una vivienda modular de 33 m², construida mediante módulos de estructura de madera con cámaras de aire en la envolvente. La vivienda cuenta con dos puertas exteriores y cinco ventanas, y tampoco contempla baño ni instalaciones eléctricas.

La Tabla I presenta los valores de transmitancia térmica de los elementos de la envolvente utilizados en el análisis energético.

TABLA I
Transmitancia térmica de la envolvente de los modelos evaluados

Elemento	Modelo Base	M1	M2	M3
Muro	0.55	0.65	0.60	1.34
Techumbre	0.57	0.74	2.31	2.31
Piso	0.49	0.71	2.23	2.23
Puertas	1.70			
Ventanas	2.80			

Los valores de la Tabla I muestran que el modelo base presenta menores valores de transmitancia térmica en los principales elementos de la envolvente en comparación con las soluciones habitacionales disponibles en el mercado. Esto indica un mayor nivel de aislamiento térmico, lo que puede contribuir a reducir las pérdidas de energía por transmisión a través de la envolvente [12], particularmente en climas fríos como los predominantes en la zona centro-sur de Chile.

No obstante, el desempeño térmico global de una vivienda no depende únicamente de la transmitancia térmica de sus elementos constructivos. Propiedades como la densidad y la capacidad de almacenamiento térmico de los materiales también influyen en la respuesta térmica del edificio, pudiendo generar efectos beneficiosos en determinados contextos climáticos, especialmente en zonas cálidas donde la inercia térmica contribuye a amortiguar las variaciones de temperatura interior [13].

B) Simulación energética

Las Tablas II y III presentan los valores de demanda energética anual para calefacción y refrigeración, respectivamente, obtenidos a partir de las simulaciones energéticas realizadas para los distintos modelos habitacionales en las diferentes zonas climáticas del país.

TABLA II
DEMANDA ENERGÉTICA ANUAL DE CALEFACCIÓN POR
MODELO Y ZONA CLIMÁTICA

Zona climática	Ciudad	Demanda energética de calefacción kWh/año			
		Modelo Base	M1	M2	M3
A	Antofagasta	329	815	2,332	3,147
B	Copiapó	1,681	2,793	6,234	8,342
C	Valparaíso	1,021	2,120	5,283	6,899
D	Santiago	2,403	3,923	8,070	10,321
E	Concepción	2,831	4,570	9,242	11,726
F	Temuco	3,173	5,007	9,903	12,537
G	Osorno	3,641	5,490	10,645	13,445
H	Taltal	4,610	6,841	12,724	15,823
I	Coyhaique	7,481	10,674	18,246	22,569

La Fig. 6 muestra la variación de la demanda energética anual de calefacción para los distintos modelos habitacionales en las zonas climáticas evaluadas. La demanda aumenta progresivamente desde las zonas más cálidas hacia las más frías, reflejando el gradiente climático del territorio chileno y evidenciando el impacto de las condiciones climáticas sobre los requerimientos energéticos de las viviendas. Asimismo, se observa una separación creciente entre los modelos a medida que aumenta la severidad climática, donde el modelo base presenta sistemáticamente menores demandas de calefacción en todas las zonas analizadas.

Esta diferencia es particularmente significativa en las zonas climáticas más frías, donde la demanda de calefacción representa la mayor proporción del consumo energético residencial. En la zona climática I, el modelo base presenta una demanda de 7,481 kWh/año, mientras que los modelos M1, M2 y M3 alcanzan 10,674, 18,246 y 22,569 kWh/año, respectivamente, lo que implica que la demanda del modelo con menor nivel de aislamiento (M3) supera en más de tres veces la del modelo base.

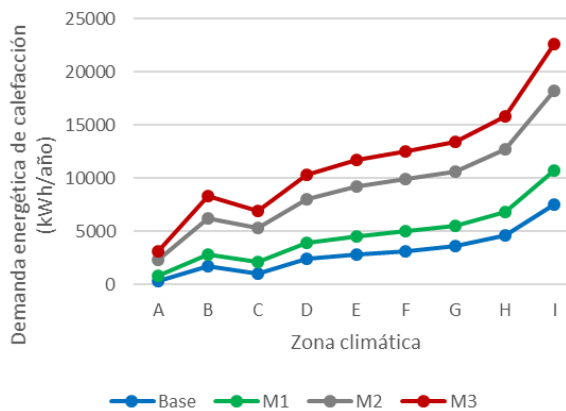


Fig. 6 Demanda energética anual de calefacción de los modelos habitacionales evaluados en las distintas zonas climáticas de Chile

Este comportamiento se relaciona directamente con los menores valores de transmitancia térmica del modelo base, los cuales reducen las pérdidas de calor a través de la envolvente durante los periodos de baja temperatura exterior [33].

TABLA III
DEMANDA ENERGÉTICA ANUAL DE REFRIGERACIÓN POR
MODELO Y ZONA CLIMÁTICA

Zona climática	Ciudad	Demanda energética de refrigeración kWh/año			
		Modelo Base	M1	M2	M3
A	Antofagasta	3,135	748	691	1,431
B	Copiapó	3,576	1,350	1,398	2,531
C	Valparaíso	1,623	230	153	482
D	Santiago	2,198	910	990	1,659
E	Concepción	1,683	407	294	710
F	Temuco	1,655	458	377	816
G	Osorno	1,420	241	154	390
H	Taltal	1,586	343	175	437
I	Coyhaique	371	0	0	0

En contraste, los resultados de demanda energética para refrigeración presentan un comportamiento diferente. En las zonas climáticas más cálidas, el modelo base muestra mayores requerimientos de refrigeración que algunos modelos de referencia. Por ejemplo, en la zona climática A alcanza 3,135 kWh/año, mientras que los modelos M1 y M2 presentan valores significativamente menores. Este comportamiento sugiere que, en climas cálidos, mayores niveles de aislamiento térmico pueden dificultar la disipación del calor acumulado en el interior de la vivienda, incrementando la demanda de refrigeración [34].

Los resultados también evidencian la existencia de una zona de transición climática ubicada aproximadamente entre las zonas C y D, a partir de la cual el modelo base cambia su desempeño relativo respecto de las viviendas de referencia. Mientras en climas cálidos la mayor demanda de refrigeración penaliza su desempeño global, en climas templados y fríos la reducción de la demanda de calefacción pasa a dominar el balance energético total, favoreciendo la solución con mayor nivel de aislamiento térmico.

Para evaluar el desempeño energético global de los modelos habitacionales se analizó la demanda energética total, definida como la suma de las demandas de calefacción y refrigeración. La Fig. 7 muestra la variación de esta demanda para las distintas zonas climáticas del país, permitiendo identificar una zona de transición entre las zonas C y D, a partir de la cual el modelo base pasa a presentar un mejor desempeño energético global. Este comportamiento evidencia el efecto combinado del nivel de aislamiento térmico y las condiciones climáticas sobre la demanda energética total.

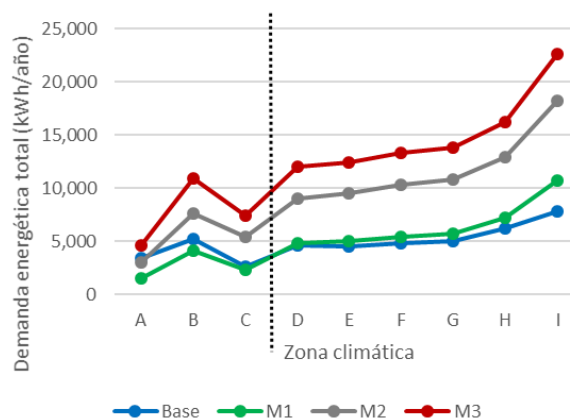


Fig. 7 Demanda energética total anual de los modelos habitacionales evaluados en las distintas zonas climáticas de Chile

En comparación con M1, el modelo base presenta un mayor consumo total en las zonas cálidas A, B y C, con incrementos de 121.6%, 26.9% y 12.5%, respectivamente. Sin embargo, a partir de la zona D, el modelo base comienza a mostrar reducciones progresivas de la demanda total, alcanzando una disminución de 26.4% en la zona I. En comparación con M2, el modelo base presenta reducciones de demanda energética total que varían entre 31.1% y 57.0% desde la zona B hasta la I, mientras que en la zona A su consumo resulta 14.6% superior. Por su parte, respecto de M3, el modelo base presenta menores demandas energéticas totales en todas las zonas climáticas evaluadas, con reducciones que oscilan entre 24.3% y 65.2%, lo que confirma su mejor desempeño global frente al modelo con menor nivel de aislamiento térmico.

Adicionalmente, resulta relevante contextualizar los resultados obtenidos respecto del desempeño energético observado en viviendas residenciales en Chile. Estudios recientes indican que la demanda energética solo para calefacción en viviendas ubicadas en ciudades del extremo sur del país puede alcanzar valores entre 134 y 236 kWh/m²año, especialmente en climas fríos como Punta Arenas [35]. En el caso del modelo base analizado en esta investigación, la demanda energética total (calefacción y refrigeración) alcanza aproximadamente 226 kWh/m²año en la zona climática más fría evaluada, mientras que en la zona más cálida se reduce a cerca de 99 kWh/m²año. Considerando que el valor reportado en la literatura corresponde únicamente a calefacción, mientras que el presente estudio incorpora tanto calefacción como refrigeración, estos resultados evidencian un desempeño energético altamente competitivo para una vivienda de emergencia. Este resultado adquiere especial relevancia considerando que las soluciones constructivas analizadas no corresponden a envoltentes térmicas optimizadas, lo que indica que mediante estrategias de mejora de bajo costo sería posible reducir aún más la demanda energética y mejorar las condiciones de habitabilidad de este tipo de soluciones.

No obstante, los resultados también evidencian una limitación del modelo en climas cálidos, donde el mayor nivel de aislamiento térmico del sistema propuesto puede incrementar la demanda de refrigeración al dificultar la disipación del calor acumulado en el interior [36]. Este comportamiento sugiere que, en contextos climáticos de mayor carga de enfriamiento, el diseño de viviendas de emergencia no debiese centrarse únicamente en reducir la transmitancia térmica de la envoltente, sino también en incorporar estrategias complementarias de control solar, ventilación natural y disipación térmica nocturna [37]. En este sentido, el modelo evaluado representa una solución con buen desempeño en climas templados y fríos, pero con margen de mejora en condiciones cálidas.

C) Costos operacionales asociados al consumo de energía

Los resultados del análisis de costos operacionales muestran que las diferencias en la demanda energética entre los modelos habitacionales se traducen directamente en variaciones significativas en los costos anuales de climatización. La Tabla IV presenta los costos energéticos anuales estimados para los distintos modelos habitacionales en las zonas climáticas evaluadas.

TABLA IV
COSTO ENERGÉTICO ANUAL DE CLIMATIZACIÓN POR
MODELO Y ZONA CLIMÁTICA CLP/año

Zona climática	Ciudad	Modelo Base	M1	M2	M3
A	Antofagasta	875,353	394,970	763,912	1,156,861
B	Copiapó	1,456,715	1,148,025	2,114,827	3,012,908
C	Valparaíso	776,014	689,725	1,595,466	2,166,324
D	Santiago	1,043,507	1,096,124	2,054,808	2,717,064
E	Concepción	1,127,597	1,243,255	2,382,093	3,106,513
F	Temuco	1,339,287	1,515,991	2,851,672	3,704,122
G	Osorno	1,364,952	1,545,651	2,912,490	3,731,300
H	Taltal	1,421,982	1,648,728	2,960,321	3,731,670
I	Coyhaique	2,251,954	3,061,303	5,232,953	6,472,789

En las zonas climáticas cálidas (A–C), el modelo base presenta costos operacionales superiores a los del modelo M1, lo cual se explica principalmente por su mayor demanda de refrigeración. Sin embargo, a partir de la zona climática D se observa un cambio en el comportamiento relativo de los modelos, donde el modelo base comienza a presentar menores costos de operación que las viviendas de referencia.

Esta tendencia se vuelve más evidente en las zonas climáticas templadas y frías (E–I), donde la demanda de calefacción domina el balance energético anual. En estos casos, el mejor desempeño térmico del modelo base permite reducir significativamente los costos de climatización. Por ejemplo, en la zona climática I el costo anual estimado para el modelo base alcanza aproximadamente 2.25×10^6 CLP/año, mientras que los modelos M1, M2 y M3 presentan costos de 3.06×10^6 , 5.23×10^6 y 6.47×10^6 CLP/año, respectivamente.

Estos resultados evidencian que las mejoras en el nivel de aislamiento térmico pueden generar reducciones sustanciales en los costos operacionales de las viviendas en climas fríos, en concordancia con lo reportado por Martínez-Soto et al. (2021), quien señala que, a medida que se incrementan las medidas de aislamiento térmico, la demanda energética se vuelve progresivamente menos sensible a las variaciones de la temperatura exterior [27]. En este sentido, un mayor nivel de aislamiento permite desacoplar parcialmente el comportamiento energético de la vivienda respecto de las condiciones climáticas externas, contribuyendo a estabilizar la demanda de energía y mejorar el desempeño térmico del sistema constructivo.

Asimismo, si bien las tarifas eléctricas presentan variaciones entre las distintas ciudades consideradas, el efecto dominante en los costos operacionales corresponde a las diferencias en la demanda energética entre los modelos habitacionales.

En este contexto, si bien en las zonas climáticas del sur de Chile el uso de leña y gas continúa siendo predominante en viviendas de emergencia o temporales, en este estudio se asumió el uso de sistemas de climatización eléctricos mediante bomba de calor con el fin de evaluar el desempeño energético de los modelos bajo un escenario homogéneo y comparable entre zonas climáticas [30,38]. Asimismo, la adopción de sistemas eléctricos de alta eficiencia se encuentra alineada con las tendencias actuales de electrificación del sector residencial y las políticas de descarbonización energética [25,39]. No obstante, es importante señalar que el uso de otras fuentes energéticas, así como diferencias en la eficiencia de los sistemas de climatización (por ejemplo, entre bombas de calor y estufas a leña), podría modificar los costos operacionales absolutos. Sin embargo, es esperable que las diferencias relativas entre los modelos habitacionales evaluados se mantengan, dado que estas están determinadas principalmente por la demanda energética de cada solución constructiva.

D) Análisis de sensibilidad de los costos energéticos

Dado que las mayores demandas energéticas se observan en las zonas climáticas más frías, el análisis de sensibilidad se realizó para la zona climática I, correspondiente a la ciudad de Coyhaique. La Tabla V presenta los costos operacionales anuales estimados para los distintos modelos habitacionales bajo los tres escenarios de tarifa eléctrica considerados.

TABLA V
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO ENERGÉTICO ANUAL DE CLIMATIZACIÓN EN LA ZONA CLIMÁTICA I CLP/AÑO

Escenario tarifario	Modelo Base	M1	M2	M3
Tarifa -20%	1,801,563	2,449,042	4,186,362	5,178,231
Tarifa base	2,251,954	3,061,303	5,232,953	6,472,789
Tarifa +20%	2,702,345	3,673,564	6,279,544	7,767,347

Los resultados muestran que las variaciones en el precio de la energía afectan proporcionalmente los costos operacionales de todos los modelos habitacionales evaluados. Sin embargo, estas variaciones no modifican el desempeño relativo entre las soluciones analizadas. En todos los escenarios considerados, el modelo base mantiene los menores costos operacionales, mientras que el modelo M3 presenta sistemáticamente los valores más elevados.

Por ejemplo, en el escenario base el costo anual estimado para el modelo base es aproximadamente 2.25×10^6 CLP/año, mientras que el modelo M3 alcanza 6.47×10^6 CLP/año, lo que representa una diferencia superior a 4.2×10^6 CLP/año. Incluso bajo el escenario de tarifa eléctrica reducida, el modelo base mantiene una ventaja económica significativa respecto de las viviendas con menor nivel de aislamiento térmico.

Estos resultados evidencian que las mejoras en el desempeño térmico de la envolvente tienen un efecto más determinante sobre los costos operacionales que las variaciones razonables en el precio de la energía, lo que refuerza la importancia de incorporar criterios de eficiencia energética en el diseño de viviendas de emergencia destinadas a contextos climáticos fríos. Asimismo, el hecho de que el desempeño relativo entre los modelos se mantenga constante en los distintos escenarios analizados evidencia la robustez de los resultados frente a variaciones en las condiciones económicas consideradas.

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó el desempeño energético y económico de un modelo de vivienda de emergencia modular reutilizable desarrollado para el contexto chileno, comparándolo con distintas soluciones habitacionales actualmente disponibles en el mercado. El análisis consideró el comportamiento energético de los modelos en las distintas zonas climáticas del país, así como los costos operacionales asociados al consumo energético para climatización.

Los resultados muestran que el modelo modular reutilizable presenta un mejor desempeño térmico en comparación con las viviendas de emergencia analizadas, lo que se refleja en menores valores de transmitancia térmica en los principales elementos de la envolvente y en una reducción significativa de la demanda energética de calefacción en todas las zonas climáticas evaluadas. En la zona climática más fría analizada, la demanda de calefacción del modelo con menor nivel de aislamiento supera en más de tres veces la del modelo base. No obstante, el desempeño energético relativo de las soluciones habitacionales depende del clima. En zonas cálidas, el mayor nivel de aislamiento térmico del modelo base puede generar mayores requerimientos de refrigeración. Sin embargo, a partir de una zona de transición climática ubicada aproximadamente entre las zonas C y D, la reducción de la demanda de calefacción comienza a dominar el balance

energético anual, favoreciendo el desempeño global del modelo con mejor aislación.

Desde una perspectiva económica, el mejor desempeño energético del modelo modular reutilizable se traduce en menores costos operacionales en las zonas climáticas templadas y frías. En la zona climática más fría analizada, el costo anual estimado de climatización para el modelo base alcanza aproximadamente 2.25 millones de CLP, mientras que los modelos con menor nivel de aislamiento pueden superar los 6 millones de CLP por año. Asimismo, el análisis de sensibilidad realizado sobre la tarifa eléctrica muestra que, aunque las variaciones en el precio de la energía afectan el valor absoluto de los costos operacionales, no modifican el desempeño relativo entre los modelos habitacionales evaluados.

En consecuencia, las viviendas de emergencia modulares reutilizables representan una alternativa viable para mejorar la eficiencia energética, reducir los costos operacionales y aumentar la resiliencia de las estrategias habitacionales implementadas en procesos de reconstrucción posterior a desastres, contribuyendo además a mejorar las condiciones de habitabilidad de las familias afectadas. Desde una perspectiva de implementación, el modelo propuesto presenta ventajas logísticas relevantes, tales como su carácter modular, facilidad de transporte y potencial de montaje rápido, lo que resulta especialmente adecuado para contextos de emergencia. No obstante, su adopción a gran escala también depende de factores económicos y sociales, incluyendo la disponibilidad de recursos, la capacidad de gestión local y la aceptación por parte de los usuarios.

Es importante señalar que el presente estudio se centró en la evaluación de los costos operacionales asociados al consumo energético para climatización, por lo que no se consideraron costos iniciales de fabricación, transporte, montaje o reutilización de los sistemas. En este sentido, un análisis de costo de ciclo de vida más completo permitiría incorporar estos factores y proporcionar una evaluación económica integral del modelo propuesto.

En términos de política pública, los resultados obtenidos sugieren la conveniencia de incorporar criterios de desempeño térmico diferenciados según zona climática en el diseño de viviendas de emergencia, evitando enfoques estandarizados que no consideran la diversidad climática del país. En particular, los resultados evidencian que el nivel de aislamiento térmico tiene un impacto determinante en el desempeño energético en climas fríos, mientras que en zonas cálidas se requiere complementar estas estrategias con medidas de control térmico pasivo.

En esta línea, futuras investigaciones deberían considerar la validación empírica del modelo mediante la construcción y monitoreo de prototipos en condiciones de operación, lo que permitiría contrastar los resultados de simulación con datos reales y fortalecer la solidez de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] L. Yáñez-Sandivari, S. Ríos, C. Cáceres, A. León, Predicting and segmenting donor behavior under disaster exposure: A socio-technical and data-driven approach: Evidence from natural disasters in Chile, *Progress in Disaster Science* 29 (2026) 100493. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100493>.
- [2] L. Yáñez-Sandivari, P. Sebastián Ríos, N. Cristian Cáceres, G. Angelo León, Understanding Donor Motivation through Social Constructs, Machine Learning, and Predictive Analytics: Evidence from Natural Disasters in Chile, *Procedia Comput. Sci.* 270 (2025) 1428–1437. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.264>.
- [3] A. Serey, S.A. Sepúlveda, Comprehensive earthquake-induced landslide inventory dataset of the 2010 Chile megathrust earthquake, *Data Brief* 57 (2024) 111078. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111078>.
- [4] E. Wagemann, R. Moris, Transitional habitability: Solutions for post-catastrophe in Chile, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 31 (2018) 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.007>.
- [5] C. Magalhães Lima, M.F. Fialho Santos, V.M. Andreola, M.Y.R. da Gloria, R.D. Toledo Filho, Development of prefab shelter using bamboo culms and bamboo bio-concrete for emergency scenarios, *Cleaner Materials* 18 (2025) 100340. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100340>.
- [6] P. Ghannad, Y.-C. Lee, J.O. Choi, Feasibility and Implications of the Modular Construction Approach for Rapid Post-Disaster Recovery, *International Journal of Industrialized Construction* 1 (2020) 64–75. <https://doi.org/10.29173/ijic220>.
- [7] Y. Zeng, B. Di, X. Liu, W. He, J. Li, Y. Shui, B. Zhang, H. Chen, M. Zhang, Q. Pan, Worse or better? Incorporating the time perspective into residents' life satisfaction during temporary housing, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 128 (2025) 105727. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105727>.
- [8] O.S. Asfour, Learning from the past: Temporary housing criteria in conflict areas with reference to thermal comfort, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 38 (2019) 101206. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2019.101206>.
- [9] A. Eltaweel, R. Saint, B. D'Amico, F. Pomponi, A parametric thermal analysis of refugees' shelters using incremental design and affordable construction material, *Energy Build.* 290 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113110>.
- [10] E. Avlar, S. Limoncu, D. Tizman, Post-earthquake temporary housing unit: CLT E-BOX, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 38 (2023) 471–482. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1027894>.
- [11] C. Rojas, M. Cea, A. Iriarte, G. Valdés, R. Navia, J.P. Cárdenas-r, Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings, *Sustainable Materials and Technologies* 17 (2019) e00102. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00102>.
- [12] C. Rojas-Herrera, A. Martínez-soto, C. Avendaño-vera, R.C. Carrasco, Industrialized Construction: A Systematic Review of Its Benefits and Guidelines for the Development of New Constructive Solutions Applied in Sustainable Projects, *Applied Sciences (Switzerland)* (2025) 1–30.
- [13] C. Rojas-Herrera, A. Martínez-Soto, C. Avendaño-Vera, J.P. Cárdenas-R, Characterization and utilization of sawdust waste generated from advanced manufacture for its application as a thermal insulation in sustainable buildings using the blowing technique, *Journal of Building Engineering* 88 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109217>.
- [14] A. Martínez-Soto, G. Arias-Guerra, A. Reyes-Riveros, C. Rojas-Herrera, D. Sanhueza-Catalán, Maximize Energy Efficiency in Homes: A Parametric Simulation Study Across Chile, *Buildings* 15 (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15213828>.
- [15] C.J. Whitman, G. Armijo, L.N. Schiappacasse, Methodology for Informed Design of Sustainable Tourism Accommodation in Chile's 9th Region the Gateway to Patagonia, *Energy Procedia* 78 (2015) 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.633>.
- [16] S.Y. Chen, Y. Song, D. Albright, W. Pang, Logistics planning for direct temporary disaster housing assistance under demand uncertainty,

- Socioecon. Plann. Sci. 96 (2024) 102072. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102072>.
- [17] P. Mercader-Moyano, P. Porras-Pereira, C. Levinton, Circular economy and regenerative sustainability in emergency housing: Eco-efficient prototype design for subasi refugee camp in Turkey, *Sustainability (Switzerland)* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13148100>.
- [18] S. Lee, R. Ito, H. Harada, Electricity self-sufficiency of off-grid mobile homes as temporary housing: A feasibility study in Japan, *Sustain. Cities Soc.* 121 (2025) 106221. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106221>.
- [19] J.S. Gubbins, J.I. Baixas, F. Profesor, Emergencia y permanencia. Un caso de investigación aplicada y prototipo, (2013).
- [20] A. Álvarez-Agea, P. Bris-Marino, F. Bendito-Muñoz-De-Cuerva, D. Martínez-Díaz, Emergency living: A post-disaster transitional habitat for Tome (Chile), *Urbano* 27 (2024) 86–99. <https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.50.07>.
- [21] R.M. Garay, W. Figueroa, F. Pfenniger, R. Tapia, J. Larenas, Project shelter, Part 1: Fire resistance and thermal insulation, *Revista de La Construcción* 16 (2017) 339–354. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.2.339>.
- [22] Ministerio del Interior, Ley N.o 21.364 que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la Oficina Nacional de Emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa normas que indica. *Diario Oficial de la República de Chile*, 7 de agosto de 2021., 2021.
- [23] F. González, F. Baeza, R. Valdebenito, B.N. Sánchez, A. Diez-Roux, A. Vives, Improvements in habitability and housing satisfaction after dwelling regeneration in social housing complexes. The RUCAS study, *Soc. Sci. Med.* 355 (2024) 117090. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2024.117090>.
- [24] W. Hughes, W. Zhang, Evaluation of post-disaster home livability for coastal communities in a changing climate, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 96 (2023) 103951. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103951>.
- [25] X. Wang, W. Feng, V. Letschert, N. Khanna, J. Ke, N. Zhou, K. You, A techno-economic analysis of net-zero transition in Chile's building sector, *Energy* 334 (2025) 137511. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137511>.
- [26] G. Romero Quidel, M.J. Soto Acuña, C.J. Rojas Herrera, K. Rodríguez Neira, J.P. Cárdenas-Ramírez, Assessment of Modular Construction System Made with Low Environmental Impact Construction Materials for Achieving Sustainable Housing Projects, *Sustainability (Switzerland)* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15108386>.
- [27] A. Martínez-Soto, M. Iannantuono, P. Macaya-Vitali, E. Nix, Towards low-carbon housing in Chile: Optimisation and life cycle analysis of energy-efficient solutions, *Case Studies in Thermal Engineering* 28 (2021) 101579. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101579>.
- [28] K. Rodríguez Neira, C.J. Rojas-Herrera, J.P. Cárdenas-Ramírez, J. Torres Ramo, A. Sánchez-Ostiz, Characterization and Energy Performance of Rice Husk Fiber Insulation Applied by the Blowing Technique in an Industrialized Modular Housing System, *Applied Sciences (Switzerland)* 15 (2025). <https://doi.org/10.3390/app15094602>.
- [29] C. Rojas-Herrera, A. Martínez-Soto, R. Batres, R. Cancino Carrasco, N. Reyes Barbato, Multi-objective optimization of an industrialized wall system for sustainable housing, *Case Studies in Thermal Engineering* 76 (2025) 107306. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107306>.
- [30] A. Qatarani Nejad, B. Yang, E. Hu, M. Arjomandi, Comparative evaluation of COP and phase change impacts in reversed rankine and brayton cycles for high-temperature heat pump systems, *Energy Conversion and Management* X 28 (2025) 101393. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101393>.
- [31] Ministerio de Energía, Tarifas de suministro eléctrico para clientes regulados (BT1) Chile, (2024). https://doi.org/https://www.enel.cl/content/dam/enel-cl/es/personas/informacion-de-utilidad/tarifas-y-reglamentos/tarifas/tarifas-reguladas/2026/Enel%20Distribuci%C3%B3n%20Chile%20SA._Tarifas%20Suministro%20El%C3%A9ctrico%2024T_%20VAD%205T%20Marzo%20de%202026.pdf.
- [32] S. Vera, F. Bernal, E. Sauma, Do distribution companies loose money with an electricity flexible tariff?: A review of the Chilean case, *Energy* 55 (2013) 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.024>.
- [33] E. Rodrigues, J. Parente, M.S. Fernandes, Building for tomorrow: Analyzing ideal thermal transmittances in the face of climate change in Brazil, *Appl. Energy* 355 (2024) 122360. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.122360>.
- [34] A. Invidiata, E. Ghisi, Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil, *Energy Build.* 130 (2016) 20–32. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.07.067>.
- [35] L. Larrea-Sáez, C. Cuevas, Y. Casas-Ledón, Energy and environmental assessment of the chilean social housing: Effect of insulation materials and climates, *J. Clean. Prod.* 392 (2023) 136234. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136234>.
- [36] M.A. Alosshan, Evaluating the effects of climate change on energy use and cooling demands in mid-aged residential buildings in Saudi Arabia, *Energy Reports* 15 (2026) 109106. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2026.109106>.
- [37] A.M. Qahtan, N. Al-Tamimi, I. Baklouti, R.A. Almasri, A comprehensive review of water-based passive cooling for building envelopes in arid climates: A biomimicry-inspired approach, *Journal of Building Engineering* 114 (2025) 114296. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.114296>.
- [38] H. Zhao, Y. Zheng, X. Liu, L. Ni, Capacity investigation of air source heat pump heating and cooling system for ultra-low energy residential building in hot summer and cold winter area: A case study of Shanghai, *Energy* 349 (2026) 140657. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2026.140657>.
- [39] J. Yuan, X. Li, X. Xiang, Y. Xiang, W. Feng, Provincial decarbonization in China's rural residential sector: from end-use electrification to grid decarbonization, *Environ. Res.* (2026) 124438. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2026.124438>.