

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA PARA EL DISEÑO EFICIENTE DE MÓDULOS FUNCIONALES

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION AND ENERGY SIMULATION FOR THE EFFICIENT DESIGN OF FUNCTIONAL MODULES

Ma. Cecilia Demarchi^a, Alejandro E. Albanesi^a y Federico Favre^b

^a*Centro de Investigación de Métodos Computacionales, CONICET-UNL, Col. Ruta 168 s/n, Predio CONICET Santa Fe, Argentina. ingmcdemarchi@gmail.com, aalbanesi@cimec.santafe-conicet.gov.ar, <https://cimec.conicet.gov.ar>*

^b*Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. ffavre@fing.edu.uy, <https://www.fing.edu.uy/es/iimpi>*

Palabras clave: Arquitectura modular, Eficiencia energética, EnergyPlus, Algoritmo Genético.

Resumen. Frente al contexto actual de crisis energética y ambiental, el desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y eficientes adquiere un carácter urgente. Este trabajo aborda el análisis y la optimización de módulos funcionales prefabricados, pensados para su uso como viviendas u oficinas temporales. Fabricados en taller, estos módulos permiten un mayor control sobre la calidad constructiva, la gestión de residuos y la reducción de contaminantes, en comparación con los sistemas tradicionales de construcción in situ. Su principal ventaja radica en la adaptabilidad mediante la adecuada elección de dimensiones y materiales. En este sentido, se plantea una metodología basada en simulación computacional del rendimiento térmico y energético, acoplada a optimización multiobjetivo, para minimizar la demanda energética y maximizar el confort térmico interior, que permitan establecer lineamientos de diseño para una arquitectura modular eficiente, adaptable y sustentable.

Keywords: Modular architecture, Energy efficiency, EnergyPlus, Genetic algorithm.

Abstract. Given the current context of energy and environmental crises, the development of sustainable and efficient housing solutions becomes urgent. This work addresses the analysis and optimization of prefabricated functional modules designed for use as temporary housing or offices. Manufactured in a workshop, these modules allow for greater control over construction quality, waste management, and pollutant reduction, compared to traditional on-site construction systems. Their main advantage lies in their adaptability through the appropriate choice of dimensions and materials. In this regard, a methodology based on computational simulation of thermal and energy performance, coupled with multi-objective optimization, is proposed to minimize energy demand and maximize interior thermal comfort, allowing for the establishment of design guidelines for efficient, adaptable, and sustainable modular architecture.

1. INTRODUCCIÓN

Frente a la crisis energética que se atraviesa a nivel nacional e internacional, impulsada por el crecimiento de la población, el desarrollo de sus actividades, la creciente demanda de condiciones de confort y la escasa diversificación de la matriz energética, se intensifican los esfuerzos científicos orientados al desarrollo de tecnologías que contribuyan a mitigar este problema. En este contexto, el sector edilicio representa aproximadamente el 30 % del consumo total de energía, considerando tanto la etapa constructiva como la operativa (Min (2022)). Por lo tanto, resulta urgente implementar estrategias que mejoren su eficiencia.

Desde el punto de vista del diseño y la construcción, la arquitectura modular se presenta como una alternativa prometedora. A diferencia de la construcción tradicional, los módulos basados en estructuras metálicas revestidas con paneles de chapa y material aislante, construidos en fábrica y luego montados en el sitio, permiten un mayor control sobre el proceso de diseño y el proceso constructivo. Esta industrialización garantiza una menor variabilidad en las propiedades térmicas de los materiales, facilitando una mejor precisión en la estimación del desempeño energético. Además, permite optimizar la gestión de residuos y reducir la emisión de contaminantes durante la obra. Otro beneficio relevante es la posibilidad de ampliación, remodelación o refacción mediante el simple reemplazo de placas, sin necesidad de intervenciones de gran envergadura.

En función de las prestaciones de este tipo de construcción, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para el análisis de la eficiencia energética de módulos habitacionales que pueda ser utilizada en la etapa de diseño. La propuesta se basa en el uso del motor de simulación EnergyPlus (EnergyPlus (2023)) acoplado a un algoritmo genético de optimización multiobjetivo (Alexakis et al. (2025)), con el fin de minimizar la demanda energética y maximizar el confort térmico interior. Como caso de estudio, se toma una vivienda modular construida en la ciudad de San Javier, Santa Fe, que sirve como base para el modelo computacional. A partir de este modelo, se analizan el comportamiento térmico-energético, posibles estrategias de mejora y su desempeño frente a distintos escenarios. Por otro lado, se compara el comportamiento térmico respecto a técnicas constructivas tradicionales, y sus ventajas y desventajas en cuanto al rendimiento energético.

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el análisis de la eficiencia energética de las viviendas se basa en el acoplamiento de un motor de simulación energética (EnergyPlus) con un algoritmo de optimización multiobjetivo (NSGA II).

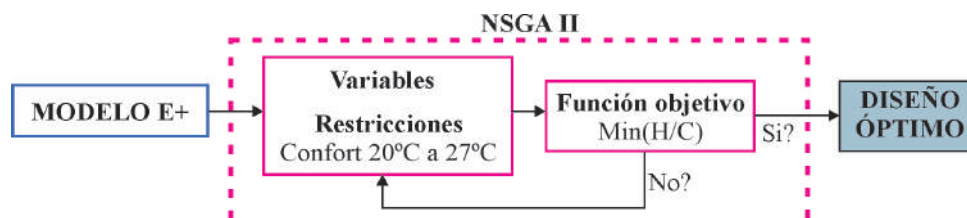


Figura 1: Bucle iterativo para el diseño óptimo de edificios

Tal como se muestra en la Fig. 1, el procedimiento se desarrolla mediante un bucle iterativo en el que el algoritmo genera soluciones candidatas y las evalúa en EnergyPlus, obteniendo la demanda de calefacción, refrigeración y las temperaturas interiores. Estas alternativas se

contrastan con los objetivos de minimizar el consumo energético y mantener el confort térmico en el rango de 20 °C a 27 °C. El proceso se repite hasta conformar un conjunto de soluciones óptimas, explorando múltiples combinaciones de diseño.

2.1. Caso de estudio

Se analiza, como caso de estudio, una vivienda modular ubicada en la localidad de San Javier (Provincia de Santa Fe, Argentina), compuesta por tres módulos funcionales: uno destinado a estar, cocina y comedor; otro a dormitorios y baño; y un módulo de paso central que actúa como nexo e ingreso principal a la vivienda. Las dimensiones, distribución de los ambientes, orientación y materiales utilizados se presentan en la Fig. 2.

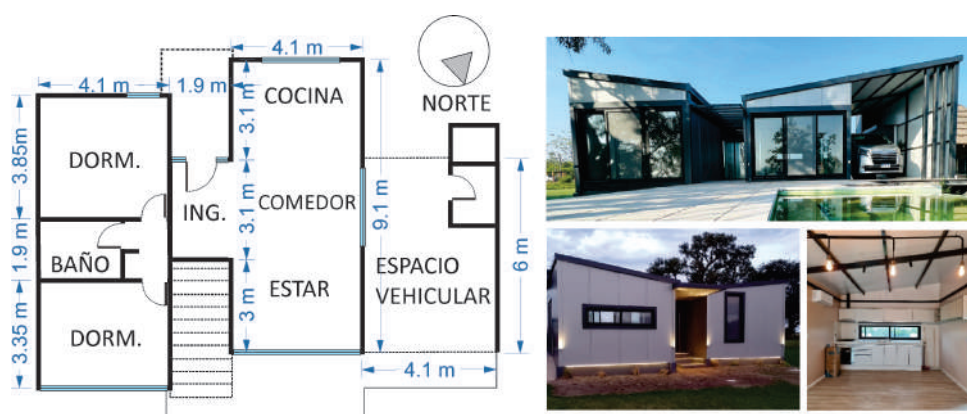


Figura 2: Planta y fotografías del caso de estudio

En cuanto a los materiales que conforman la envolvente, los muros están compuestos por paneles de chapa con terminación gris silver y EPS de 50 mm de espesor como aislante. En algunos casos, la terminación interior corresponde directamente a la chapa blanca del panel, mientras que en otros se incorpora una cámara de aire de 10 cm acompañada de placa de yeso revestida con cerámico blanco. Respecto al techo, los módulos laterales presentan paneles de chapa galvanizada, con aislamiento de EPS de 30 mm y chapa blanca en el interior; mientras que el módulo de ingreso está conformado por un panel de características similares pero con terminación interior foilroof y cielorraso de placa de yeso. Las paredes divisorias interiores, están resueltas con paneles de PVC beige y una cámara de aire de 10 cm. En relación con el piso, la composición incluye placas cementicias de 12 mm sobre fenólico y placa cementicia de 18 mm apoyadas sobre una estructura metálica elevada entre 30 y 50 cm respecto al terreno natural. En cuanto a los cerramientos vidriados, los ventanales orientados al norte están resueltos con DVH laminado 3+3, cámara de aire de 12 mm y una segunda lámina DVH laminado 3+3; la puerta corrediza presenta DVH laminado 3+3, cámara de aire de 12 mm y vidrio claro de 5 mm; mientras que las ventanas ubicadas al sur corresponden a un DVH laminado 3+3, cámara de aire de 9 mm y vidrio claro de 5 mm.

En cuanto al sistema de acondicionamiento térmico, la vivienda dispone de equipos de aire acondicionado frío/calor instalados en cada dormitorio y en el área de cocina-comedor-estar. Respecto a los electrodomésticos, se incluyen heladera, cocina y horno eléctricos, un calefón eléctrico para la provisión de agua caliente sanitaria y un televisor en el estar. La iluminación, tanto interior como exterior, se resuelve mediante lámparas LED de bajo consumo, garantizando un menor requerimiento energético.

En relación al uso, la vivienda funciona como casa de fin de semana y vacaciones, siendo ocupada de manera temporal por un grupo familiar compuesto por dos adultos y dos niños. Adicionalmente, se cuenta con registros mensuales de consumo energético, lo que permite ajustar los parámetros del modelo computacional y aproximar los resultados de la simulación a los datos reales.

2.2. Modelo computacional

El modelo computacional se construye a partir de la definición de la geometría, los materiales y los elementos constructivos, empleando la información detallada en la Figura 2. Para su análisis, la vivienda se sectoriza en seis zonas térmicas, tal como se ilustra en la Figura 3: Zona 1, cámara de aire entre el suelo y el piso elevado; Zona 2, estar, cocina y comedor; Zona 3, ingreso; Zona 4, dormitorio frente; Zona 5, paso y baño; y Zona 6, dormitorio contrafrente.

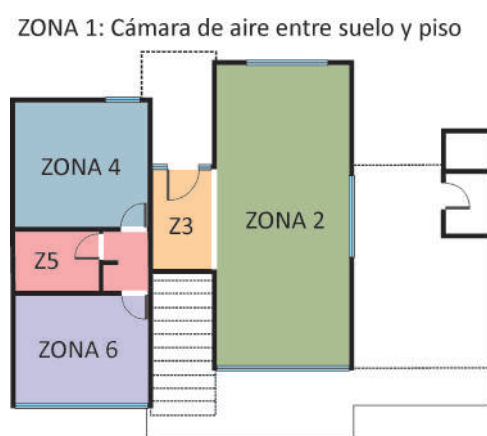


Figura 3: Definición de zonas del modelo computacional

El acondicionamiento térmico de las Zonas 2, 4 y 6 se modela mediante ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem de EnergyPlus, permitiendo estimar la energía neta necesaria para calefacción y refrigeración sin depender de la eficiencia de los equipos. Además, se considera la ventilación natural e infiltración (Orne et al. (1994)) mediante AirFlowNetwork, activada según las condiciones exteriores de temperatura (entre 19 y 28°C) y viento (menor a 10 m/s), recurriendo a los equipos de aire acondicionado únicamente cuando la ventilación no logra mantener el confort térmico entre 20°C y 27°C (Documentation (2023), Li et al. (2024), Barone et al. (2023)).

Las cargas internas se definen considerando los electrodomésticos y el patrón de uso de la vivienda. En particular, se asignan 150 W correspondientes a los electrodomésticos en las Zonas 2 y 3, 75 W en las Zonas 4 y 6, y 100 W en la Zona 5. En lo que respecta a iluminación, se considera una densidad de 6 W/m² para las Zonas 2 y 3, y 4 W/m² para las Zonas 4 y 6. Por otro lado, la ocupación se establece según los horarios de uso: las Zonas 2 y 3 se consideran ocupadas entre las 8 y las 22 hs, mientras que las Zonas 4 y 6 se consideran ocupadas de 22 a 8 hs.

2.3. Variables de análisis

Dado que el análisis se realiza sobre una vivienda ya construida (ZIZI (2025)), las variables consideradas se centran en la envolvente opaca, es decir, para la vivienda modular se evalúan el tipo y espesor del material aislante, la terminación exterior de los paneles y la orientación de la edificación. La combinación de estas variables genera un total de 85.680 configuraciones

posibles por orientación, las cuales serán evaluadas mediante la metodología de simulación y optimización propuesta. En este contexto, la Fig. 4 detalla cada una de las variables consideradas y sus propiedades térmicas.



Figura 4: Materiales elegidos en base a técnicas constructivas modulares

Además, dado que uno de los objetivos del estudio es comparar el rendimiento energético de la vivienda modular con métodos de construcción tradicional, se proponen los paquetes constructivos detallados en la Tabla 1 para la envolvente opaca.

Elemento	Terminación interior	Tipo de ladrillo	Terminación exterior
Mampostería: Terminación exterior revocada y pintada	Revoque grueso + Revoque fino + Pintura blanca	Ladrillo común (pared de 15 y 30 cm) Ladrillo de hormigón hueco de 12 cm Ladrillo de hormigón macizo de 12 cm Ladrillo cerámico portante de 12 cm Ladrillo cerámico portante de 18 cm	Revoque impermeable + Revoque grueso + Revoque fino + Pintura blanca
Mampostería: Terminación exterior ladrillo a la vista	Revoque impermeable + Revoque grueso + Revoque fino + pintura blanca	Ladrillo común (pared de 15 y 30 cm)	Ladrillo a la vista
Techo	Chapa galvanizada	Sin aislante EPS de espesor 3,5 6 y 10 cm	Placa de yeso 12 mm + Pintura blanca

Tabla 1: Materiales elegidos en base a técnicas constructivas tradicionales

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis del consumo energético de calefacción y refrigeración de la vivienda, considerando tanto la construcción modular como la construcción tradicional en los elementos de su envolvente opaca. En primer lugar, se examinan los materiales que ofrecen un rendimiento energético óptimo para cada orientación; a continuación, se compara el consumo entre diferentes orientaciones; y, finalmente, se analiza el desempeño energético en relación con las técnicas constructivas tradicionales. Por otro lado, se identifican los factores que inciden sobre el rendimiento térmico y energético, los cuales deben ser considerados en el diseño de la vivienda para mejorar su eficiencia.

3.1. Análisis de materiales óptimos

A continuación se presentan los diez paneles que exhiben el menor consumo energético para cada orientación. Las Tablas 2, 3, 4 y 5 incluyen la identificación de los paneles y sus propiedades, tales como la absorptividad térmica (α_T) y solar (α_S) de la chapa exterior, el tipo y

espesor del material aislante (e , cm), la terminación interior (chapa blanca o placa de yeso) y la transmitancia térmica (U , W/m^2K). Por otro lado, las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran la relación entre los valores de U en muros y techos y el consumo anual de energía.

Orientación Norte

N°	MUROS						N°	TECHOS					
	Ext.		Aislante		Int.	U		Ext.		Aislante		Int.	U
	α_T	α_S	Mat.	e				α_T	α_S	Mat.	e		
69	0.85	0.40	PUR	3	Chapa	0.867	64	0.85	0.40	EPS	10	Chapa	0.210
76	0.95	0.95	PUR	10	P. Yeso.	0.174	88	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso.	0.174
20	0.25	0.35	PIR	10	P. Yeso.	0.164	39	0.85	0.40	PIR	10	P. Yeso.	0.164
76	0.95	0.95	PUR	10	P. Yeso.	0.174	64	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso.	0.174
28	0.85	0.40	PIR	10	P. Yeso.	0.164	20	0.95	0.95	PIR	10	P. Yeso.	0.164
107	0.85	0.40	EPS	6	P. Yeso.	0.275	38	0.85	0.40	EPS	6	P. Yeso.	0.275
32	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240	40	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240
67	0.85	0.40	PUR	6	P. Yeso.	0.237	40	0.85	0.40	PUR	6	P. Yeso.	0.237
64	0.25	0.35	PUR	10	Chapa	0.260	80	0.25	0.35	PUR	10	Chapa	0.260
108	0.85	0.40	ESP	10	P. Yeso.	0.209	88	0.85	0.40	ESP	10	P. Yeso.	0.209

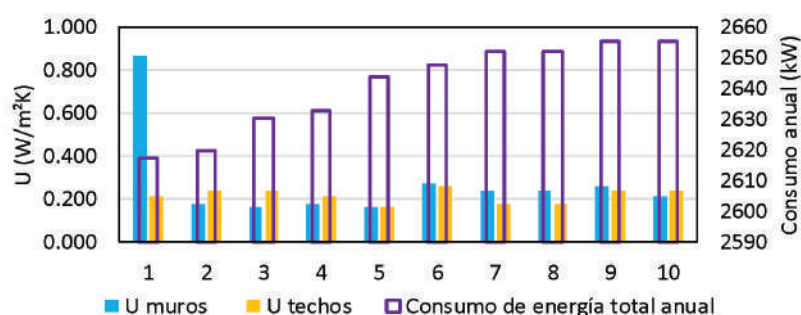


Figura 5: Comparación de valores U vs consumo de energía total anual: orientación Norte

Orientación Este

Nº	MUROS						Nº	TECHOS					
	Ext.		Aislante		Int.	U		Ext.		Aislante		Int.	U
	α_T	α_S	Mat.	e				α_T	α_S	Mat.	e		
70	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.520	88	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260
76	0.85	0.40	EPS	5	Chapa	0.700	88	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260
20	0.85	0.40	PUR	6	Chapa	0.433	39	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.433
76	0.85	0.40	EPS	5	Chapa	0.700	64	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.433
28	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.520	20	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.433
107	0.85	0.40	PUR	6	Chapa	0.583	38	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260
32	0.85	0.40	PIR	5	Chapa	0.480	40	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.433
67	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.400	40	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260
64	0.85	0.40	EPS	10	Chapa	0.350	80	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260
108	0.25	0.35	PUR	10	Chapa	0.260	88	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.260

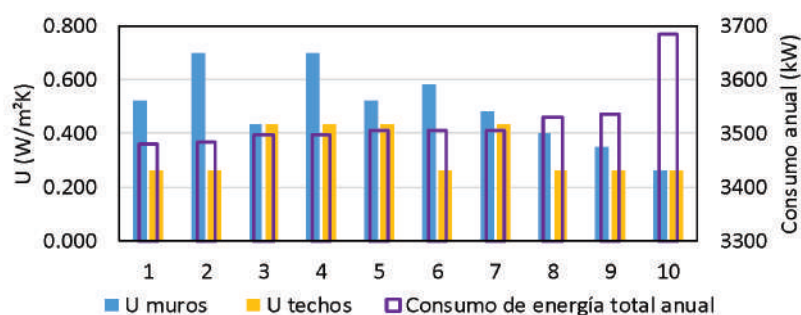


Figura 6: Comparación de valores U vs consumo de energía total anual: orientación Este

Orientación Sur

Nº	MUROS						Nº	TECHOS					
	Ext.		Aislante		Int.	U		Ext.		Aislante		Int.	U
	α_T	α_S	Mat.	e				α_T	α_S	Mat.	e		
32	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240	39	0.85	0.40	PUR	6	Chapa	0.234
111	0.85	0.40	EPS	10	Chapa	0.350	88	0.85	0.40	PIR	10	P. Yeso	0.240
32	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240	38	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.257
32	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240	37	0.85	0.40	PUR	3	Chapa	0.320
66	0.85	0.40	PUR	5	P. Yeso	0.257	38	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.257
28	0.85	0.40	PIR	10	P. Yeso	0.163	38	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.257
31	0.85	0.40	PIR	6	Chapa	0.400	38	0.85	0.40	PUR	5	Chapa	0.257
92	0.25	0.35	EPS	10	P. Yeso	0.207	40	0.85	0.40	PUR	10	Chapa	0.172
68	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.172	24	0.85	0.65	PIR	10	Chapa	0.163
20	0.25	0.35	PIR	10	P. Yeso	0.163	48	0.85	0.65	PUR	10	Chapa	0.172

Tabla 4: Materiales óptimos para la orientación Sur

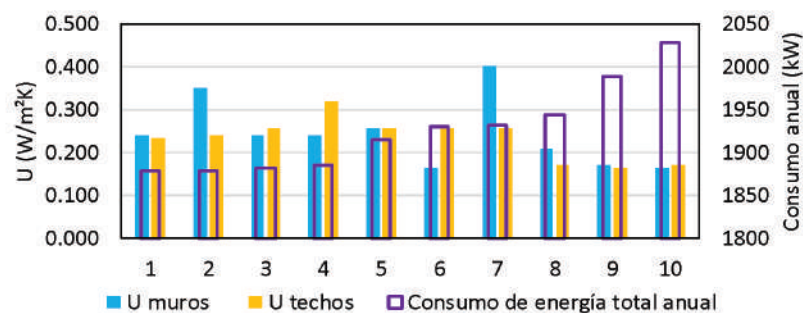


Figura 7: Comparación de valores U vs consumo de energía total anual: la orientación Sur

Orientación Oeste

Nº	MUROS						Nº	TECHOS					
	Ext.		Aislante		Int.	U		Ext.		Aislante		Int.	U
	α_T	α_S	Mat.	e				α_T	α_S	Mat.	e		
111	0.85	0.40	EPS	10	Chapa	0.240	88	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240
69	0.85	0.40	PUR	3	Chapa	0.867	40	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.172
71	0.85	0.40	PUR	6	Chapa	0.400	40	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.172
109	0.85	0.40	EPS	5	Chapa	0.480	38	0.85	0.40	PUR	5	P. Yeso	0.257
72	0.85	0.40	PUR	10	Chapa	0.260	63	0.85	0.40	EPS	6	P. Yeso	0.272
32	0.85	0.40	PIR	10	Chapa	0.240	39	0.85	0.40	PUR	6	P. Yeso	0.234
64	0.25	0.35	PUR	10	Chapa	0.240	38	0.85	0.40	PUR	5	P. Yeso	0.257
64	0.25	0.35	PUR	10	Chapa	0.350	40	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.172
67	0.85	0.40	PUR	6	P. Yeso	0.234	40	0.85	0.40	PUS	10	P. Yeso	0.172
68	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.163	40	0.85	0.40	PUR	10	P. Yeso	0.163

Tabla 5: Materiales óptimos para la orientación Oeste

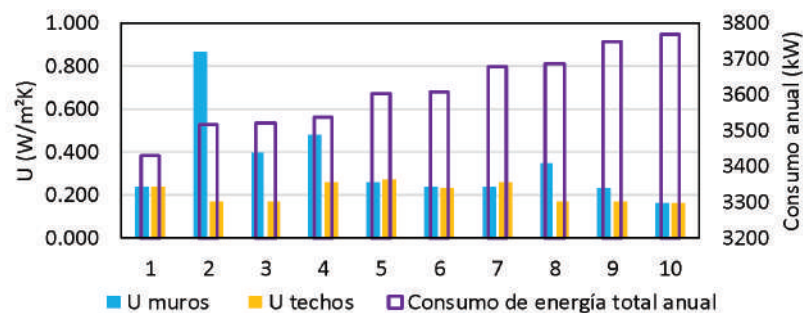


Figura 8: Comparación de valores U vs consumo de energía total anual: la orientación Oeste

En las orientaciones Norte, Este, Sur y Oeste (Tablas 2, 3, 4 y 5), predominan colores claros como Gris Silver, Galvanizado y Cincalum en la terminación exterior, lo que contribuye a limitar la ganancia de calor por radiación. Las terminaciones interiores varían entre la misma chapa del panel o placa de yeso, según los valores de U . Estos rondan en rangos que varían mayormente entre 0.163 y 0.70 W/m²K, reflejando la influencia conjunta del aislante, el espesor y la terminación interior. En todas las orientaciones, las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran que el menor consumo energético no siempre se asocia a los valores de U más bajos, sino que se logra con transmitancias intermedias que permiten un adecuado equilibrio entre resistencia térmica y disipación de calor. En particular, transmitancias relativamente altas en muros favorecen la liberación del calor acumulado durante los períodos de radiación, mientras que soluciones con cámara de aire o placas de yeso aportan resistencia adicional sin comprometer la capacidad de disipación, de modo que la elección de materiales y terminaciones debe orientarse a mantener dicho equilibrio para reducir la demanda energética y garantizar el confort interior.

3.2. Análisis energético según la orientación

De acuerdo con la Fig. 9, que compara el consumo energético de calefacción y refrigeración de los individuos óptimos para cada orientación, se observa que la ganancia de calor por radiación en los acristalamientos predomina sobre otros fenómenos de transferencia de calor. El consumo para refrigeración varía entre 1.500 y 4.000 kW anuales, mientras que el de calefacción no supera los 400 kW, lo que indica que la ganancia de calor por ventanas es suficiente para mantener confort en invierno, pero no en verano. Esto explica además por qué el consumo disminuye al aumentar la transmitancia térmica. Por otro lado, debido a la disposición de las aberturas, las orientaciones Este y Oeste presentan el mismo consumo, aproximadamente el doble que la orientación Norte y el triple que la orientación Sur, reforzando el papel dominante de la ganancia de calor por acristalamientos.

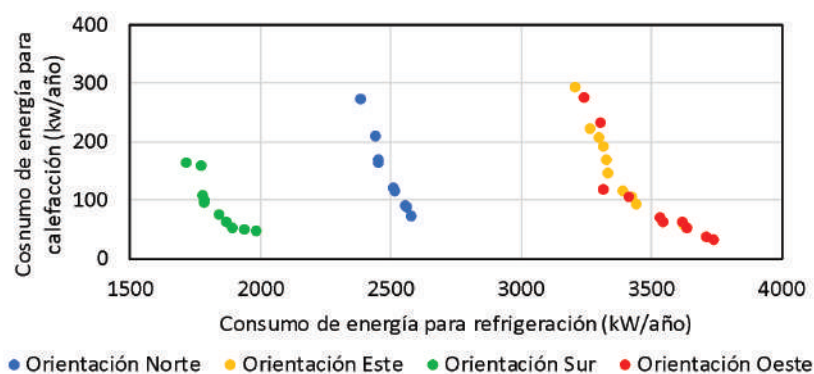


Figura 9: Comparación de consumo de energía para cada orientación

3.3. Análisis energético de la construcción modular vs construcción tradicional

En esta sección se compara el consumo energético de la vivienda utilizando paneles de construcción modular con técnicas constructivas tradicionales (Fig. 10). La construcción modular reduce significativamente la demanda de calefacción en todas las orientaciones y la de refrigeración principalmente en la orientación Sur. Para la orientación Norte, muros de ladrillo común de 30 cm con techo de chapa aislado con EPS presentan mejor rendimiento en verano, mientras que en Este y Oeste, la construcción modular generalmente alcanza el mayor rendimiento.

Estas diferencias se explican por la ganancia de calor por acristalamientos y las variaciones en transmitancia de los distintos elementos, donde los muros de ladrillo presentan valores de U entre 1.43 y 2.44 W/m²K según tipo y espesor, y los techos de chapa alcanzan de 0.51 W/m²K sin aislante hasta 0.21 W/m²K con EPS. Este análisis demuestra la ventaja de la construcción modular respecto a la tradicional al incorporar aislante en paredes y techos, algo poco usual en la construcción tradicional, que como se puede ver, mejora considerablemente su rendimiento cuando el techo está aislado térmicamente.

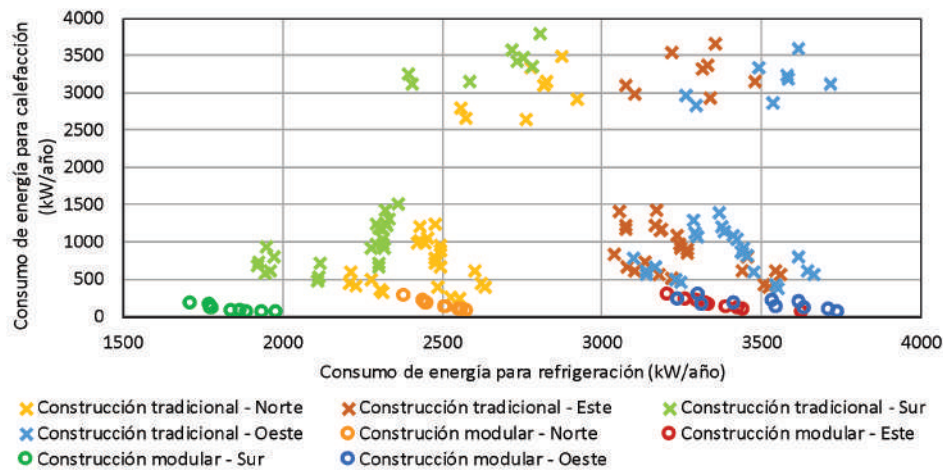


Figura 10: Comparación de consumos de energía construcción modular vs construcción tradicional

Aislando el efecto de la orientación y considerando únicamente la Sur, la cual es la que mejor rendimiento energético posee, se identifican cinco grupos de técnicas constructivas. El grupo 1 corresponde a techos sin aislante, mostrando que el consumo de refrigeración mejora al disminuir el valor de U . Los grupos 2, 3 y 4 incluyen techos con EPS, diferenciándose por la transmitancia de las paredes y mejorando significativamente el rendimiento térmico. Finalmente, el grupo 5, correspondiente a la construcción modular, logra la mayor reducción tanto en el consumo de calefacción como de refrigeración. En esta gráfica podemos ver que la tendencia es la reducción del consumo de energía utilizando materiales aislantes.

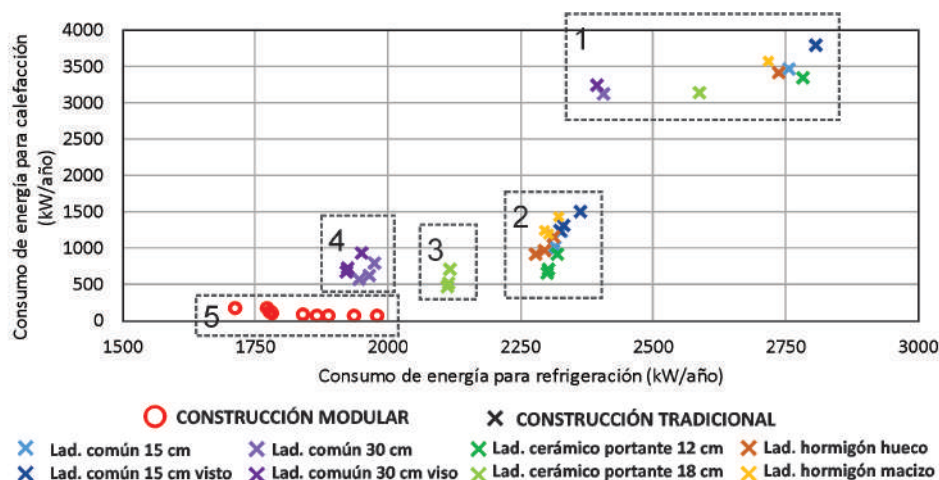


Figura 11: Comparación de consumos de energía construcción modular construcción tradicional: orientación Sur

4. CONCLUSIONES

A partir del diseño de la envolvente de una vivienda modular, utilizando un modelo que acopla EnergyPlus y un algoritmo genético, y comparado con técnicas de construcción tradicional, se concluye que la eficiencia energética requiere herramientas computacionales para explorar la gran cantidad de soluciones posibles y sus interdependencias en conducción, convección y radiación.

Desde el punto de vista del edificio, la envolvente, su geometría, materiales y orientación son determinantes en el rendimiento térmico. En particular, la relación entre acristalamiento y orientación resulta clave, ya que los ventanales generan la mayor ganancia de calor, mientras que los materiales opacos y el aislante controlan la absorción y retención térmica. Por otra parte, el uso de materiales aislantes, es vital para la reducción de energía para climatización, especialmente en techos.

La comparación entre construcción modular y tradicional muestra claros beneficios en el consumo energético para climatización debido a su capacidad aislante respecto a la tradicional, en la que normalmente no suele usarse. A ello se le suma el control de residuos y producción, posicionando la construcción modular como una alternativa eficiente y sostenible.

Finalmente, se recomienda ampliar la optimización considerando la relación ventana-pared, el tipo de vidrio, el análisis de ciclo de vida y los costos de construcción como objetivos adicionales.

REFERENCIAS

- Informe estadístico anual 2022. Informe Técnico, Ministerio de Economía de Argentina, 2022.
- Alexakis K., Benekis V., Kokkinakos P., y Askounis D. Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, 328:115216, 2025. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115216>.
- Barone G., Buonomano A., Forzano C., Giuzio G., Palombo A., y Russo G. A new thermal comfort model based on physiological parameters for the smart design and control of energy-efficient hvac systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173:113015, 2023. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113015>.
- Documentation E. *Input Output Reference*. U.S. Department of Energy, 2023.
- EnergyPlus. <https://energyplus.net>, 2023.
- Li Y., Sun J., Cui B., Li K., Dong J., Lian J., Zhao X., y Nawaz K. Multitarget control models for building thermal comfort and indoor air quality - a critical review. *Results in Engineering*, 24:103608, 2024. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103608>.
- Orne M., Liddament M.W., y Wilson A. *Numerical Data for Air Infiltration Natural Ventilation Calculations*. International Energy Agency, 1994.
- ZIZI M. <https://www.tingladoszizi.com.ar/modulos-funcionales/>, 2025.